



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TM 184835

PENGARUH KECEPATAN PUTARAN PADA *ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE* PRODUK PENGECORAN SENTRIFUGAL

Galih Ajeng Siti Andari
NRP. 02111340000040

Dosen Pembimbing:
Indra Sidharta, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



TUGAS AKHIR – TM 184835
**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN PADA
ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE PRODUK
PENGECORAN SENTRIFUGAL**

Galih Ajeng Siti Andari
NRP. 0211134000040

Dosen Pembimbing:
Indra Sidharta, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR – TM 184730
**THE EFFECT OF ROTATIONAL SPEED
ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE MADE BY
CENTRIFUGAL CASTING**

Galih Ajeng Siti Andari
NRP. 02111340000040

Supervisor:
Indra Sidharta, S.T., M.Sc.

Department Of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2019

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN PADA ALUMINIUM
MATRIX COMPOSITE PRODUK PENGECORAN
SENTRIFUGAL**





TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

GALIH AJENG SITI ANDARI

NRP. 021113410000040

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. **Indra Sidharta, ST, MSc.**
NIP. 198006192006041004  (Pembimbing)
2. **Suwarno, ST, MSc, PhD.**
NIP. 198005202005011003  (Penguji I)
3. **Fahmi Mubarak, ST, MSc, PhD.**
NIP. 197801152003121002  (Penguji II)
4. **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA**
NIP. 195012111985021001  (Penguji III)

**SURABAYA
JANUARI, 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH KECEPATAN PUTARAN PADA ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE PRODUK PENGECORAN SENTRIFUGAL

Nama Mahasiswa : Galih Ajeng Siti Andari
NRP : 021113410000040
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Indra Sidharta, ST, MSc.

Abstrak

Pada era teknologi yang semakin maju, manusia terus berusaha menemukan material baru yang memiliki sifat-sifat unggul, contohnya material komposit. *Aluminium matrix composite* (AMC) merupakan salah satu dari jenis klasifikasi komposit dengan menggunakan logam aluminium sebagai matriks penyusunnya. Salah satu aplikasi AMC adalah silinder ruang bakar (*cylinder liner*) yang berfungsi sebagai tempat bercampurnya bahan bakar dan udara. Agar tidak terjadi kebocoran yang disebabkan oleh gesekan antara *ring piston* dan dinding *cylinder liner*, maka diperlukan dinding *cylinder liner* yang mempunyai nilai kekerasan yang tinggi serta nilai keausan yang rendah. Oleh karena itu, dilakukan penelitian pada AMC dengan menggunakan metode *centrifugal casting* untuk mengetahui nilai kekerasan, nilai laju keausan serta struktur mikro yang terbentuk.

Penelitian ini dilakukan menggunakan material aluminium sebagai matriks dan Al_2O_3 (alumina) sebagai penguat (*reinforcement*). Proses peleburan aluminium dan pengadukan dengan penambahan partikel penguat Al_2O_3 (alumina) dilakukan pada suhu 900°C . Pengadukan dilakukan selama 15 menit lalu aluminium dan alumina yang telah bercampur dituang ke dalam pengecoran sentrifugal yang diputar dengan beberapa variasi kecepatan putaran yaitu 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm. Setelah itu dilakukan pengujian yaitu pengujian kekerasan, keausan dan

metalografi untuk dianalisa mikrostruktur beserta cacat coran yang timbul. Setelah itu material spesimen hasil pengecoran dibandingkan sifat serta struktur mikronya dengan *cylinder liner* yang dijual dipasaran.

Hasil yang didapatkan adalah variasi kecepatan putaran pengecoran sentrifugal berpengaruh terhadap nilai kekerasan material AMC dimana semakin besar kecepatan putaran yang diaplikasikan maka nilai kekerasan yang dihasilkan semakin meningkat begitupula dengan nilai laju keausan dihasilkan, dimana nilai laju keausan menurun seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran. Selain itu terlihat cacat coran seperti porositas, inklusi, dan penyusutan (*shrinkage*) pada produk coran. Cacat porositas berkurang seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran yang diaplikasikan.

Kata kunci: *Metal Matrix Composite, Al_2O_3 , Centrifugal Casting, Uji Kekerasan, Uji Keausan, Cacat Coran, Mikrostruktur*

THE EFFECT OF ROTATIONAL SPEED ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE BY CENTRIFUGAL CASTING

Student's Name : Galih Ajeng Siti Andari
NRP : 021113410000040
Department : Teknik Mesin
Supervisor : Indra Sidharta, ST, MSc.

Abstract

In the advanced technology era, humans continue to invent new materials that have superior properties. Aluminium matrix composite (AMC) is one of the types of composite classifications using aluminium as its constituent matrix. One of the important engine parts in the automotive field is the cylinder liner, which is the part that functions as a mixture of fuel and air. In order to avoid leakage caused by friction between the piston ring and cylinder liner wall, a cylinder liner wall that has a high hardness value and low wear value is needed.

In this centrifugal casting method, the reinforcing material Al_2O_3 (alumina) is put into molten aluminum, then stirred until the reinforcing material is mixed with molten aluminum. The process of melting aluminum and stirring with the addition of Al_2O_3 (alumina) reinforcing particles was carried out at 900°C . Stirring is carried out for 15 minutes then the mixture of aluminum and alumina is poured into centrifugal casting which is rotated with several variations of rpm speed, namely 1000, 1500, 2000, and 2500 rpm. Tests carried out were hardness, wear test and metallographic testing. In addition, the casting material specimens are compared to the properties and microstructure of the cylinder liner sold in the market.

The results obtained are variations in the rotational speed of centrifugal casting not significantly affect the hardness of AMC material which the greater the rotational speed is applied, the value of the resulting hardness increases as well as the wear rate which the wear rate decreases with increasing rotational speed. If the wear rate decreases, the wear resistance is getting better. There are also some casting defects that arise such as porosity, inclusions and a minor shrinkage. Porosity decreases when the greater rotational speed applied

Keywords: *Metal Matrix Composite, Al_2O_3 , Centrifugal Casting, Hardness test, Wear Test, Casting Defects, Microstructure.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini. Tugas akhir ini merupakan salah satu prasyarat yang harus dipenuhi sebelum menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Keberhasilan penulis dalam menyusun laporan tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibunda **Dra. Hj. Rohyati Eko Sukmini** dan Alm. Ayahanda **Dandun Sri Mulyono** untuk segala doa, restu, kasih sayang, pengorbanan, motivasi, materi dan masih banyak lagi yang selalu dilimpahkan kepada penulis
2. Bapak **Indra Sidharta ST, MSc** selaku dosen pembimbing tugas akhir ini. Terima kasih untuk semua solusi saat banyak masalah timbul, waktu yang diberikan ditengah kesibukan, kritik, saran dan motivasi yang bapak berikan. Tanpa bapak, saya masih menyandang status mahasiswa S1 di jurusan Teknik Mesin ITS.
3. Bapak **Suwarno, ST, MSc, PhD** atas pertanyaan yang sulit dan penuh logika, Bapak **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA** atas masukan, ilmu serta kritik dan saran yang sangat membangun dan Bapak **Fahmi Mubarak, ST. MSc**. Atas saran dan pertanyaan-pertanyaanya yang membuat saya untuk terus mencari tahu. Terima kasih saya haturkan kepada beliau bertiga yang menyempatkan waktu untuk menjadi dosen penguji tugas akhir serta kesabarannya selama asistensi revisi tugas akhir.
4. Bapak **Alief Wikarta, ST, PhD**. selaku dosen wali yang telah memberikan bantuan dan bimbingan masalah perkuliahan selama awal perkuliahan sampai akhirnya

penulis dapat menyelesaikan kuliah jenjang S1 di Teknik Mesin ITS

5. Saudara Kembar saya **Djarot Dimas Achmad Andaru** atas doa dan motivasinya serta bantuannya dalam memeriksa tulisan saya terutama pengecekan *grammar* yang digunakan pada abstrak.
6. Semua warga laboratorium metalurgi **Yola, Firman, Rayhan, Afif, Wira, Antok, Fitri, Fikri, Engra, Izda, Novandita, Tya, Amanda, Zuli, Mas Pendi, Sutrisno, Mukarromah, Ananta, Rizqu, Mas Rey, Fitri 58 dan Mona** serta warga yang lebih dulu lulus yaitu **Edwin, Bernard, Ayunisa, Leonard, Luthfan, Usi, Joko** dan beberapa warga lab lainnya yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu per satu. Terima Kasih telah berbagi ilmu suka, duka pengalaman canda dan tawa.
7. Semua karyawan laboratorium metalurgi dan Teknik Mesin. **Pak Gatot, Pak Mantri, Mas Agus, Mas Faisal, Cak Bud, Mas Reza** dan semuanya. Terimakasih telah membantu dalam banyak hal
8. Kepada seluruh angkatan M56 dan M57 yang mengajarkan banyak pengalaman dan pelajaran hidup
9. Kepada sahabat saya sejak duduk di bangku SMA yang dukungannya selalu mengalir untuk saya yaitu **Alvisha, Firda, Bella, Sheila, Khrisna, Apip, Misyel, Tiwul, Ratih, Inas**. Terimakasih telah menjadi tempat curahan hati saya dikala stress, tempat bertukar cerita canda dan tawa. Kalian selalu menjadi motivasi saya agar terus maju meraih cita-cita
10. Kepada sahabat saya **Tifanny Florentina dan Fitriyani Aditiya** yang setia berteman dengan saya dari mulai maba hingga saat ini. Terimakasih telah membantu saya dalam banyak hal terutama masalah drama perkuliahan, dosen dan hidup. Kalian sungguh luar biasa.
11. Tempat Pengecoran **Pak Min** karena telah bersedia membantu dan memfasilitasi saya untuk melakukan

eksperimen pengecoran serta **PT Samaco** yang telah banyak membimbing dan membantu memecahkan problem-problem lapangan selama proses eksperimen pengecoran.

12. Serta semua pihak yang telah memberikan dukungan serta bantuannya dan tidak bisa disebutkan satu per satu dihalaman ini

Penulis sadar bahwa penulisan tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua. Amin.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Abstrak	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xx
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Penelitian	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 <i>Metal Matrix Composite</i>	12
2.2.1 Proses Produksi <i>Metal Matrix Composite</i>	14
2.2.2 <i>Aluminium Matrix Composite</i> (AMC).....	17
2.3 <i>Aluminium Oxide</i>	18
2.4 <i>Centrifugal Casting</i>	19
2.5 Cacat Pengecoran	23
2.5.1 Cacat Metalurgi	24
2.5.2 Cacat Akibat Panas/Cacat Termal	27
2.5.3 Cacat Mekanis	28
METODOLOGI PENELITIAN	29

3.1 Perancangan Eksperimen.....	29
3.2 Langkah-langkah Penelitian.....	30
3.3 Alat dan Bahan	33
3.3.1 Alat.....	33
3.3.2 Bahan.....	37
3.4 Pembuatan <i>Aluminium Matrix Composite</i>.....	38
3.4.1 Proses Centrifugal Casting	38
3.5 Pengujian Spesimen.....	39
3.5.1 Pengujian Kekerasan	39
3.5.2 Pengamatan Struktur Mikro/Metalografi.....	40
3.5.3 Pengujian Keausan	41
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Pengujian Komposisi Kimia	43
4.2 Metalografi	45
4.3 Pengujian Mekanik.....	54
4.3.1 Uji Kekerasan	54
4.3.2 Uji Keausan	59
KESIMPULAN DAN SARAN	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengaruh Ukuran Butiran Al_2O_3 terhadap Nilai Kekerasan Material Al- Al_2O_3	6
Gambar 2.2 Grafik pengaruh ukuran butiran Al_2O_3 terhadap (a) nilai <i>Yield Strength</i> dan (b) <i>Elongation</i>	7
Gambar 2.3 Grafik pengaruh volume fraksi Al_2O_3 terhadap <i>Yield Strength</i>	8
Gambar 2.4 Grafik pengaruh volume fraksi Al_2O_3 terhadap % <i>Elongation</i>	8
Gambar 2.5 Grafik Rata-rata Nilai Kekerasan (Alief, 2015).....	9
Gambar 2.6 Grafik Rata-rata Kekerasan (Wibowo, 2016)	10
Gambar 2.7 Perlakuan Pembuatan <i>Metal Matrix Composite</i>	15
Gambar 2.8 <i>Bonding Fusion</i>	17
Gambar 2.9 <i>True Centrifugal Casting</i>	22
Gambar 2.10 <i>Gas Porosity</i>	25
Gambar 2.11 <i>Shrinkage Porosity</i>	25
Gambar 2.12 Macam-macam <i>Bi-film</i> : (a) Bi-film baru (b) gelembung gas (c) flux (d) kotoran tungku (e) pasir cetakan (f) oksida lama.....	26
Gambar 2.13 Inklusi.....	26
Gambar 2.14 <i>Dross</i>	27
Gambar 2.15 <i>Lumps</i>	27

Gambar 2.16 <i>Lamination Defect</i>	28
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3. 2 Centrifugal Casting.....	34
Gambar 3. 3 Tungku <i>Crucible</i>	34
Gambar 3. 4 <i>Ladle</i>	35
Gambar 3. 5 Timbangan <i>Digital</i>	35
Gambar 3. 6 <i>Thermocouple</i>	36
Gambar 3. 7 Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	36
Gambar 3. 8 Mesin Uji Kekerasan	37
Gambar 3. 9 Aluminium ADC12	37
Gambar 3. 10 Bubuk <i>Aluminium Oxide</i> (Al_2O_3)	38
Gambar 3. 11 Ilustrasi Pemotongan Spesimen	40
Gambar 3. 12 Alat Uji Keausan <i>Pin On Disc</i>	42
Gambar 4. 1 Spesimen <i>Metal Matrix Composite</i> Produk Pengecoran Sentrifugal.....	43
Gambar 4. 2 Struktur Mikro <i>Aluminium Matrix Composite</i> dengan variasi kecepatan putaran (a) 1000 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2000 rpm dan (d) 2500 rpm dengan Perbesaran 100x (<i>sample</i> potongan bagian 2 membujur).....	49

Gambar 4. 3 Struktur Mikro <i>Aluminium Matrix Composite</i> dengan variasi kecepatan putaran (a) 1000 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2000 rpm dan (d) 2500 rpm dengan Perbesaran 500x (<i>sample</i> potongan bagian 2 membujur).....	50
Gambar 4. 4 Cacat Coran (a) Porositas, (b) Shrinkage, (c) Inklusi.....	53
Gambar 4. 5 (a) Spesimen Uji Kekerasan dan (b) Spesimen Uji Keausan	55
Gambar 4. 6 Grafik Nilai Kekerasan.....	58
Gambar 4. 7 Nilai Kekerasan (BHN) Setiap Potongan (Contoh Potongan pada Variasi 2500 rpm)	59
Gambar 4. 8 Grafik Nilai Laju Keausan.....	61
Gambar 4. 9 Perbandingan (a) Nilai Kekerasan dan (b) Nilai laju keausan antara Spesimen Cor dengan Cylinder Liner	63

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Korelasi antar Parameter dan Hasil Eksperimen (F, 2003)	11
Tabel 3. 1 Contoh Tabel Pengamatan (a) Uji Mekanik (Kekerasan dan Keausan) dan (b) Uji Metalografi	41
Tabel 4. 1 Komposisi Kimia Hasil Uji Spectrometer, dan Komposisi Kimia Standar JIS H 5302.....	44
Tabel 4. 2 Hasil Reaksi <i>Interfacial</i> pada <i>Chemical Bonding</i> (Chawla, 2006)	51
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Kekerasan dan Keausan.....	57
Tabel 4. 4 Tabel data uji mekanik Spesimen Hasil Coran dengan <i>Cylinder liner</i>	62

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era teknologi yang semakin maju, manusia terus berusaha menemukan material yang bersifat unggul. Material yang digunakan pun diharuskan memiliki ketentuan tertentu sesuai kebutuhan. Tidak jarang material yang ada tidak bisa memenuhi ketentuan yang diinginkan, dikarenakan sifat material yang tidak sesuai. Mendapatkan sifat-sifat unggul dari berbagai material dapat dilakukan dengan membuat komposit. Komposit didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari dua atau lebih material penyusun yang memiliki sifat berbeda, dimana material penyusun akan berkombinasi secara makroskopik melalui proses pencampuran. Satu material berfungsi sebagai fase pengisi (*matrix*) sedangkan material lainnya berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*). Dengan penggabungan material tersebut, maka akan didapatkan suatu material baru yang sifatnya merupakan kombinasi dari material penyusunnya. Komposit dapat dikelompokkan menurut jenis matriks penyusunnya, salah satunya adalah *metal matrix composite* (MMC) atau komposit matrik logam. Komposit ini menggunakan logam sebagai matrik penyusunnya.

Belakangan ini material banyak didominasi oleh aluminium dimana jenis logam ini memiliki sifat ringan sehingga dapat meningkatkan performa serta efisiensi sebuah sistem pemesinan. AMC (*Aluminium Matrix Composite*) merupakan salah satu jenis MMC yang menggunakan aluminium sebagai matriks penyusunnya. MMC dengan penguat partikel banyak diterapkan pada bidang keteknikan dikarenakan memiliki sifat mekanik yang lebih baik seperti kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, sifat tahan aus, koefisien ekspansi panas rendah, harga kompetitif. Penguat yang umum digunakan adalah partikel SiC dan Al₂O₃ (Bonollo, 2003)

Penelitian yang dilakukan Kok dimana ia melakukan penelitian pada Al seri 2024 berpenguat partikel Al_2O_3 dengan metode *vortex* dan mempelajari sifat mekanik yang didapatkan, dimana ia menemukan kondisi optimum dari proses produksi dengan temperatur tuang 700°C , temperatur cetakan yang dipanaskan 550°C , kecepatan pengadukan 900 putaran/menit, tingkat penambahan partikel 5 g/menit serta dengan tekanan yang diterapkan 6 MPa (Kok, 2005). *Wettability* dan ikatan antara partikel Al paduan- Al_2O_3 meningkat dengan tekanan yang diterapkan begitupula porositas akan menurun karena tekanan ini. Kannan dan Kishawy melakukan tes pemotongan ortogonal untuk mempelajari pengaruh parameter pemotongan dan sifat partikel pada variasi kekerasan pada spesimen Al- Al_2O_3 menggunakan metode *microhardness*. Mereka menemukan bahwa kekerasan lebih tinggi di dekat lapisan permukaan spesimen (Kishawy, 2006)

AMC dengan penguat partikel memberikan sejumlah alternatif penggunaan karena komposit ini memiliki keunggulan dari sisi kapasitas panas spesifik dan konduktivitas panas tinggi, densitas rendah, kekuatan spesifik tinggi, kekakuan spesifik tinggi, serta koefisien ekspansi baik. Karena keunggulan ini maka penggunaan AMC sangat dipertimbangkan dan menguntungkan apabila digunakan pada aplikasi pada komponen mesin dalam bidang otomotif dan penerbangan. Salah satu bagian mesin yang penting dalam bidang otomotif adalah silinder ruang bakar (*cylinder liner*), yaitu bagian yang berfungsi sebagai tempat bercampurnya bahan bakar dan udara. Dimana pada bagian ini terjadi proses kerja hisap, kompresi, lalu kerja buang. Agar tidak terjadi kebocoran yang disebabkan oleh gesekan antara *ring piston* dan dinding *cylinder liner*, maka diperlukan dinding yang mempunyai nilai kekerasan yang tinggi serta nilai keausan yang rendah. Material *cylinder liner* yang dijual dipasaran merupakan aluminium paduan dan besi cor. Oleh karena itu *cylinder liner* banyak diteliti dengan menggunakan AMC sebagai pengganti dari

paduan aluminium karena AMC memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik.

AMC dapat dibuat dengan beberapa metode salah satunya adalah dengan cara *stir casting*. Pada penelitian ini digunakan metode pencampuran Al-Al₂O₃ dengan metode *stir casting* lalu dicetak menggunakan metode *centrifugal casting* dikarenakan metode pengecoran sentrifugal efektif untuk membentuk silinder. Pada teknik *centrifugal casting* ini, material penguatnya Al₂O₃ (alumina) dimasukkan kedalam aluminium cair, kemudian diaduk hingga material penguat tersebut tercampur dengan aluminium cair lalu dituang kedalam pengecoran sentrifugal yang diputar dengan beberapa variasi kecepatan putaran.

1.2 Perumusan Penelitian

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap struktur mikro serta cacat coran pada AMC produk pengecoran sentrifugal
2. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap sifat mekanik kekerasan pada AMC produk pengecoran sentrifugal.
3. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap ketahanan aus pada AMC produk pengecoran sentrifugal.

1.3 Tujuan Penelitian

Dengan perumusan penelitian yang timbul, penelitian ini memiliki beberapa tujuan diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap struktur mikro serta cacat coran pada AMC produk pengecoran sentrifugal.
2. Menganalisa pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap sifat mekanik kekerasan pada AMC produk pengecoran sentrifugal.

3. Menganalisa pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap ketahanan aus pada AMC produk pengecoran sentrifugal.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Aluminium yang digunakan mempunyai komposisi kimia yang sama
2. Ukuran partikel Al_2O_3 (alumina) yang digunakan dianggap seragam
3. Kecepatan tuang konstan
4. Tinggi penuangan konstan
5. Alat pengukuran sudah dikalibrasi

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi beberapa kalangan. Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan dan wawasan bagi peneliti tentang pengaruh variasi kecepatan putaran pengecoran sentrifugal terhadap nilai kekerasan, nilai keausan serta cacat coran yang timbul pada AMC produk pengecoran sentrifugal.
2. Dapat memberikan manfaat serta perhatian lebih kepada kalangan industri mengenai pengaruh variasi kecepatan putaran pengecoran sentrifugal terhadap nilai kekerasan, nilai keausan serta cacat coran yang timbul pada AMC produk pengecoran sentrifugal.

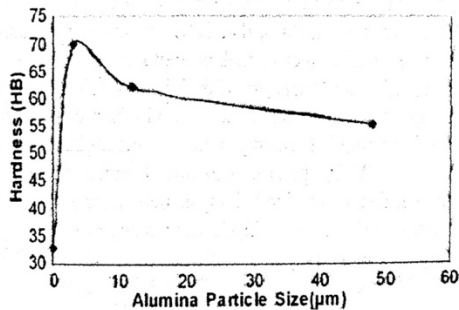
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

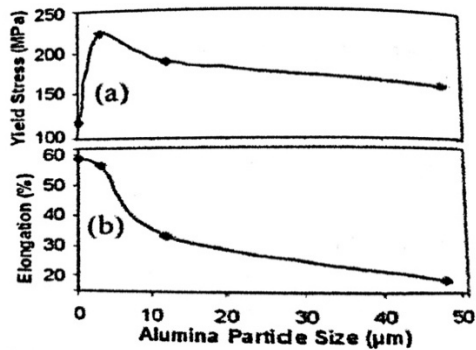
2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh N.Parvin dan M. Rahimian menggunakan penguat Al_2O_3 dengan ukuran butiran 3, 12 dan 48 μm dan volume fraksi masing-masing ukuran butiran sebesar 10%. Proses produksi menggunakan metode *sintering* dan beberapa pengujian seperti uji tarik, uji kekerasan dan SEM (*scanning electron microscope*). Hasil dari penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa material $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ yang memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan material Al murni. (Parvin-Rahimian, 2011)



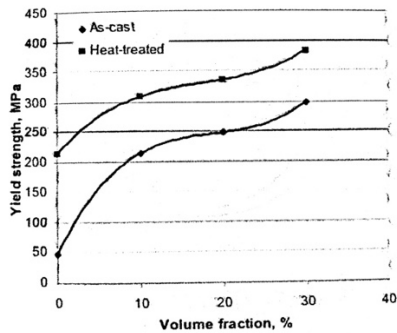
Gambar 2.1 Pengaruh Ukuran Butiran Al_2O_3 terhadap Nilai Kekerasan Material $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$

Nilai *yield strength* material $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan material Al dan menurun dengan bertambahnya ukuran butiran partikel Al_2O_3 . *Elongation* dari material $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ menurun jika dibandingkan dengan material Al seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2.



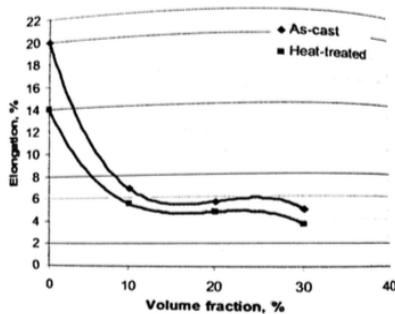
Gambar 2.2 Grafik pengaruh ukuran butiran Al_2O_3 terhadap (a) nilai *Yield Strength* dan (b) *Elongation*

Penelitian yang dilakukan Chennakesava Reddy dan A. Essa Zitoun menggunakan matriks Al6063 dengan penguat Al_2O_3 . Ukuran butiran Al_2O_3 sebesar 10 mikron dan variasi volume fraksi 10%, 20%, dan 30%. Proses pembuatan *metal matrix composite* menggunakan metode *stir casting*. Pada gambar 2.3 *yield strength* didefinisikan sebagai sebagai tegangan, sesuai dengan regangan 0.2%. Grafik menunjukkan *yield strength* meningkat seiring dengan meningkatnya volume fraksi dari Al_2O_3 pada komposit. Dengan meningkatnya volume fraksi maka lebih banyak beban yang ditransfer ke penguat Al_2O_3 yang menyebabkan tingginya *yield strength*. (Chennakesava, 2011)



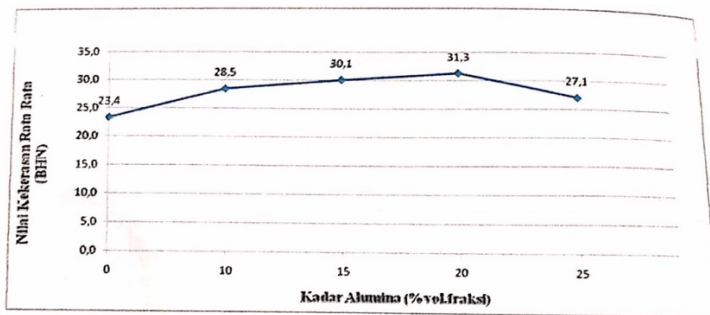
Gambar 2.3 Grafik pengaruh volume fraksi Al_2O_3 terhadap *Yield Strength*

Pada gambar 2.4 penurunan nilai keuletan sebanyak 76% saat volume fraksi 30% Al_2O_3 . Penurunan nilai keuletan dapat juga sebagai permulaan dari kekosongan struktur paduan yang dipicu oleh peningkatan volume dari penguat Al_2O_3 . (Chennakesava, 2011)



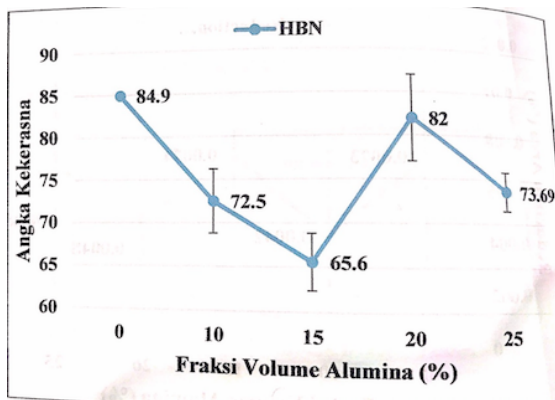
Gambar 2.4 Grafik pengaruh volume fraksi Al_2O_3 terhadap % Elongation

Pada penelitian yang dilakukan oleh Krisna Bilal Alief menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang diperoleh dari hasil pengujian kekerasan Brinnel. Gambar 2.5 diperoleh nilai kekerasan yang meningkat dari fraksi alumina sebesar 0% hingga 20% kemudian menurun pada kadar 25% fraksi alumina. Nilai kekerasan pada spesimen uji meningkat disebabkan karena partikel alumina mengisi matriks aluminium. Partikel alumina akan mencegah terjadinya dislokasi pada matriks aluminium. Akan tetapi, pada hasil pengujian nilai kekerasan pada fraksi alumina sebesar 25% mengalami penurunan. (Alief, 2015)



Gambar 2.5 Grafik Rata-rata Nilai Kekerasan (Alief, 2015)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Tito Arifianto Wibowo menunjukkan bahwa nilai kekerasan rata-rata pada aluminium matrix composite berdasarkan kadar alumina per persentase volume fraksi masing-masing seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.6. Penurunan nilai kekerasan rata-rata terjadi hingga penambahan kadar 15% fraksi volume alumina, tetapi naik ketika presentasi 20% dan menurun pada 25% fraksi volume alumina. (Wibowo, 2016).^[4]



Gambar 2.6 Grafik Rata-rata Kekerasan (Wibowo, 2016)

Penelitian yang dilakukan F. Bonollo menjelaskan efek dari perbedaan fraksi penambahan partikel penguat (alumina), temperatur tuang serta temperatur cetakan pada spesimen *Cylinder Liner* yang terbuat dari *aluminium matrix composite* menggunakan metode *centrifugal casting*. Penelitian ini menyatakan bahwa distribusi komposisi penguat (*reinforcement*) yang ideal dapat dicapai karena kombinasi parameter proses seperti temperatur penuangan logam cair, temperatur cetakan, serta konten penguat disesuaikan dengan tepat. Kombinasi optimal dapat dicapai pada saat temperatur cetakan sebesar 350°C dan temperatur penuangan sebesar 750°C serta fraksi penguat (alumina) sebesar 15% dari total keseluruhan material (Bonollo, 2003). Selain itu F. Bonollo menemukan bahwa saat kecepatan putaran (RPM) tinggi muncul daerah tanpa penguat atau *particle free region* dan ketika kecepatan putaran (RPM) rendah maka gaya sentrifugal yang terbentuk juga rendah sehingga tidak mampu mensegregasi partikel penguat sebelum terjadi solidifikasi, lalu terbentuk gradien signifikan yang selanjutnya akan membentuk komposisi konstan. Ketika temperatur penuangan terlalu tinggi, distribusi komposisi yang dikehendaki juga tidak akan tercapai. Selain itu, jika temperatur

terlalu rendah maka akan timbul porositas . Efek dari setiap variabel input dirangkum pada tabel 2.1. (Patil, 2015)

Tabel 2.1 Korelasi antar Parameter dan Hasil Eksperimen **(Patil, 2015)**

EFFECTS DETECTED	Values of process parameters		
	High Aluminium temperature	Low ΔT	Low/high die temperature (300°C/400°C)
	Low porosity Particle migration towards the outer part of liners	Higher particle amount in the outer part of liners	High/low values of Δ

Penelitian yang dilakukan Kok dimana ia melakukan penelitian pada Al seri 2024 berpenguat partikel Al₂O₃ dengan metode vortex dan mempelajari sifat mekanik yang didapatkan dimana ia menemukan kondisi optimum dari proses produksi dengan temperatur tuang 700°C, temperatur cetakan yang dipanaskan 550°C, kecepatan pengadukan 900 putaran/menit, tingkat penambahan partikel 5 g/menit serta dengan tekanan yang diterapkan 6 MPa. *Wettability* dan ikatan antara partikel Al paduan-Al₂O₃ meningkat dengan tekanan yang diterapkan tetapi porositas akan menurun karena tekanan ini (Kok, 2005). Abhishek Kumar dkk. secara eksperimental menyelidiki karakterisasi A359/Al₂O₃ MMC menggunakan metode pengadukan elektromagnetik. Mereka menemukan bahwa kekerasan dan kekuatan tarik MMC meningkat serta perlakuan pengadukan elektromagnetik menghasilkan MMC dengan ukuran butiran yang lebih kecil dan ikatan antarmuka (*interface*) matriks partikel yang baik. Kannan dan Kishawy melakukan tes pemotongan ortogonal untuk mempelajari pengaruh parameter pemotongan dan sifat partikel pada variasi kekerasan pada spesimen Al-Al₂O₃ menggunakan metode *microhardness*. Mereka menemukan bahwa kekerasan lebih tinggi di dekat lapisan permukaan spesimen. (Kishawy, 2006). Selain itu RPM juga akan mempengaruhi porositas yang terbentuk. Semakin tinggi kecepatan

putaran (RPM) maka porositas yang terbentuk semakin sedikit sehingga strukturnya lebih seragam. (Dyzia, 2012). Penelitian yang berhubungan dengan kecepatan putaran juga dilakukan oleh S. Balasivanandha yaitu bahwa kecepatan putaran yang rendah serta waktu pengadukan yang singkat maka akan terjadi kumpulan partikel pada beberapa tempat dan ada beberapa tempat yang mengalami kekosongan partikel penguat sedangkan saat kecepatan putaran tinggi dan waktu pengadukan yang cukup lama maka mikrostruktur yang terlihat menunjukkan distribusi homogen partikel penguat pada matriks aluminium. (Prabu, 2004)

2.2 Metal Matrix Composite

Penelitian mengenai *metal matrix composite* (MMC) sudah mulai dilakukan pada tahun 1960-an, akan tetapi masih banyak mengalami kendala karena pembuatan MMC memerlukan biaya yang relatif tinggi, minimnya perkembangan tentang pengetahuan tentang metal matrix composite dan lain-lain. Namun saat ini, karena kebutuhan akan suatu material yang memiliki karakteristik yang lebih baik dari bahan konvensional serta perkembangan teknologi rekayasa material yang berkembang sangat pesat maka kendala-kendala yang selama ini ditemukan dalam proses pembuatan MMC dapat diatasi. MMC merupakan salah satu jenis komposit dengan matriks berupa metal. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). MMC umumnya terdiri dari paduan logam ringan seperti aluminium, magnesium, atau titanium, serta diperkuat dengan partikel keramik, serabut, maupun serat (Ramnath, 2013). Aspek penguatan sangat penting karena menentukan sifat mekanik, biaya, dan kinerja komposit yang diberikan. Komposit diperkuat dengan partikulat (tipe penguat kontinyu) yang memiliki biaya sebanding dengan logam yang tidak diperkuat, sifat kekerasan yang jauh lebih baik, serta kekakuan dan kekuatan yang lebih baik pula. Berbeda dengan material matrik tanpa penguat dan bahan konvensional, MMC diharapkan menjadi suatu material yang tahan terhadap temperatur yang relatif tinggi.

Pembuatan komposit matrik logam telah dikembangkan dengan menggunakan penguat partikel, dan yang dapat diaplikasikan untuk berbagai industri karena penguat partikel merupakan komposit jenis *Discontinuous Metal Matrix Composite's* (DMMC), dan komposit jenis ini sering disebut dengan komposit isotropik yang artinya semua arah penguat memiliki nilai yang sama serta komposit dengan penguat jenis partikel yang sifatnya mudah diproses. Matrik berbasis logam dengan kerapatan (densitas) yang rendah secara bertahap telah banyak dikembangkan. Material utama matrik yang umum dikembangkan adalah aluminium, titanium, dan magnesium. Dalam pembuatan MMC, yang paling banyak dikembangkan adalah MMC berbasis aluminium, dan penguat yang digunakan adalah partikel SiC dan Al₂O₃ (alumina) karena disamping harga bahan baku yang relatif murah dan mudah didapat, sehingga partikel SiC dan Al₂O₃ (alumina) banyak digunakan untuk penguat dalam pembuatan MMC.

Seperti yang telah dijelaskan, bahwa dalam proses fabrikasi (*manufacturing*) MMC, matrik yang paling banyak digunakan adalah logam aluminium karena logam aluminium merupakan suatu material yang memiliki beberapa sifat yang menarik untuk dikembangkan sebagai matrik dalam proses pembuatan MMC antara lain karena memiliki densitas yang rendah, tahan terhadap korosi, memiliki sifat panas, dan sifat listrik yang baik. Logam aluminium yang biasa digunakan sebagai matrik adalah paduan Al-Si, Al-Cu, dan sebagainya. Komposit matrik aluminium biasanya menggunakan penguat Al₂O₃, SiC, C akan tetapi SiO₂, B, BN, B₄C, AlN masih dalam tahap pengembangan dan penelitian. (Nayiroh, 2013)

Keuntungan utama MMC adalah sifat fleksibilitas atau kemampuan mudah dibentuk. MMC dapat dirancang untuk memenuhi persyaratan yang tidak ada pada bahan lain, serta perancangan MMC dapat pula diatur sesuai kebutuhan yang ingin dicapai (Sukma, 2015). Keuntungan lainnya yang didapatkan

adalah ketahanan terhadap temperatur yang tinggi, kekuatan tekan dan geser yang baik serta ketahanan muia termal yang lebih baik dari material logam dan paduannya. Namun, MMC juga memiliki beberapa keterbatasan dibandingkan dengan logam, antara lain adalah biaya fabrikasi yang lebih tinggi untuk MMC yang digunakan pada mesin berkinerja tinggi. Saat ini, MMC cenderung dikelompokkan menjadi dua tipe yaitu tipe yang terdiri dari komposit kinerja tinggi yang diperkuat dengan serat bersifat kontinyu yang mahal serta memerlukan proses fabrikasi yang mahal dan tipe kedua yaitu yang terdiri dari komposit berbiaya rendah serta berkinerja rendah yang diperkuat dengan partikulat atau serat yang relatif murah. Aplikasi MMC banyak diaplikasikan pada komponen otomotif, peralatan militer, *aerospace* dan peralatan elektronik. (Juriani, 2015)

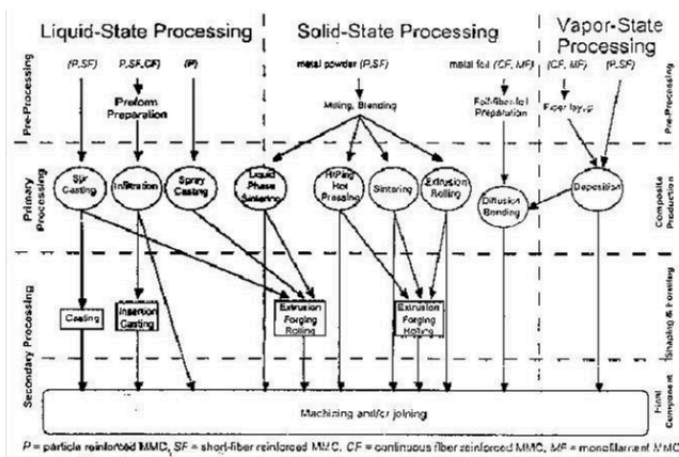
2.2.1 Proses Produksi *Metal Matrix Composite*

Material Metal Matrix Composite (MMC) dapat diproduksi dengan berbagai teknik. Pemilihan teknik proses produksi MMC adalah berdasarkan jenis, kuantitas, distribusi yang diinginkan dari komponen penguat (partikel dan serat), paduan matriks dan aplikasinya. Dengan mengubah metode pembuatan, pengolahan dan penyelesaiannya serta komponen penguat, dimungkinkan diperoleh profil karakteristik yang berbeda, walaupun komposisi dan jumlah komponen yang sama terlibat dalam produksinya. Untuk pembuatan MMC ada beberapa metode yang digunakan. Metode pembuatan yang digunakan untuk membuat komposit ini tergantung dari jenis fase matriks sebelum ditambahkan penguat. Ilustrasi klasifikasi pembuatan MMC dapat dilihat pada gambar 2.7. Setiap proses memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri, termasuk biaya produksi yang dibutuhkan. Beberapa model

pembuatan metal matrix composite dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Proses matriks fase cair (*liquid state processing*)

Proses pembuatan MMC pada fase cair melibatkan penggabungan fasa terdispersi menjadi logam matriks cair, lalu diikuti oleh proses solidifikasi. Untuk memberikan sifat mekanik komposit yang baik, ikatan *interfacial* (*wetting*) antara fase terdispersi dan matriks cair harus diperoleh. Untuk meningkatkan keadaan pembasahan (*wetting*) maka partikel fase terdispersi (serat) harus dilapisi. Lapisan yang tepat tidak hanya mengurangi energi *interfacial*, tetapi juga mencegah interaksi kimia antara fase terdispersi dan matriks.



Gambar 2.7 Perlakuan Pembuatan *Metal Matrix Composite*

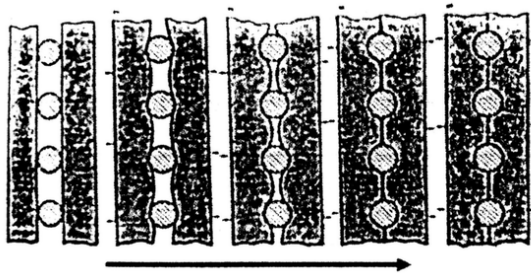
Proses pembuatan *metal matrix composite* terbagi atas:

- *Stir Casting*
Logam cair ditambahkan penguat dalam bentuk serbuk kemudian diaduk sampai berbentuk bubur.
 - *Infiltration*
Logam cair diinjeksikan ke dalam *interstice* (celah) dan disusun dari serat pendek kemudian dilakukan penyisipan partikel dalam fasa cair.
 - *Spray Casting*
Penyemprotan partikel penguat terhadap matriks komposit.
2. Proses matriks fase padat (*solid state processing*)
Pembuatan *solid state* dari *Metal Matrix Composites* (MMC) adalah proses dimana *metal matrix composite* terbentuk sebagai hasil dari matriks logam dan fase terdispersi karena saling berdifusi antara keadaan padatan pada suhu tinggi dengan tekanan rendah. Suhu rendah proses fabrikasi *solid state* (dibandingkan dengan fabrikasi keadaan cair MMC menekan reaksi yang tidak diinginkan pada batas antara matriks dan fase terdispersi (penguatan). MMC dapat mengalami deformasi setelah operasi *sintering* dengan proses *rolling*, *forging*, *pressing*, *drawing* atau ekstrusi. Operasi deformasi mungkin bersifat dingin (di bawah suhu rekristalisasi) atau panas (di atas suhu rekristalisasi). Deformasi bahan komposit sinter dengan fasa terdispersi dalam bentuk serat pendek menghasilkan orientasi yang diinginkan dari serat dan sifat anisotropi material (kekuatan yang disempurnakan sepanjang orientasi serat).
3. Ekstrusi
Proses ini merupakan proses dimana material dibentuk dengan cara penyemprotan partikel penguat pada

materi yang kemudian dibentuk menjadi profil-profil tertentu.

Adapun metode pembentukan fase padat komposit yang lain, yaitu *bonding diffusion*, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.8. Unsur-unsur komposit (lapisan) yang dirakit oleh layering array (atau pembungkus untuk bentuk silinder atau cincin) serat dan matriks untuk mencapai orientasi serat yang telah ditentukan yang telah ditentukan dan ketebalan komposit. Penggabungan komposit dicapai dengan menerapkan tekanan tinggi dalam arah normal ke permukaan lapis pada temperatur yang cukup untuk menghasilkan difusi atom dari paduan matriks. Proses ini dilakukan di lingkungan vakum.

Pada proses fase gas (*vapor state processing*), infiltrasi yang telah meleleh dicampur dengan gas *inert* dari luar. Proses pencampuran gas inert terhadap matrik ini berlangsung di sebuah bejana tekan.



Gambar 2.8 *Bonding Fusion*

2.2.2 Aluminium Matrix Composite (AMC)

Salah satu jenis komposit matrik logam yang banyak dikembangkan industri otomotif saat ini adalah komposit yang matriknya berupa logam MMC yaitu komposit bermatriks aluminium AMC (*aluminium matrix composite*). Matriks yang digunakan dalam aluminium murni atau paduan Al seperti Al-Si, Al-Cu, 2xxx, 6xxx dan 7xxx, sedangkan penguat yang

umum digunakan adalah silicon dan Al_2O_3 . Pemakaian bahan aluminium atau paduannya sebagai matriks karena aluminium memiliki densitas rendah, selain itu aluminium memiliki kemampuan untuk dikuatkan dengan pengendapan presipitat, ketahanan korosi sangat baik, serta konduktivitas panas dan listrik yang tinggi (Ramnath, 2013)

AMC dapat menghasilkan karakteristik mekanik yang bervariasi tergantung jenis paduannya. Berdasarkan jenis penguatnya, AMC dapat dikelompokkan menjadi AMC dengan penguat partikel, penguat *whisker*, penguat fiber kontinu serta penguat mono filamen. Sejumlah teori dan penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanis komposit aluminium dengan perbedaan jenis matrik dan penguat berhubungan dengan struktur mikronya. Sehingga pemilihan jenis, geometri dan volume fraksi penguat sangat penting dalam menentukan kombinasi terbaik dari sifat-sifatnya dan harga yang murah. Proses pembuatan komposit aluminium dapat dilakukan dengan metalurgi serbuk, infiltrasi cairan logam, *squeeze casting*, pembentukan *semisolid*, dan lain lain. Komposit dengan penguat partikel berukuran lebih dari $1\ \mu\text{m}$ memiliki dua mekanisme penguatan yaitu partikel pembawa beban dari matrik dan penguatan dengan formasi *interface* inkoheren antar partikel dengan matrik. Besarnya kekuatan komposit dipengaruhi oleh volume fraksi, distribusi dan bentuk partikel (Swasono, 2010)

2.3 Aluminium Oxide

Aluminium oxide merupakan material keramik yang paling penting. Material yang lebih banyak disebut dengan alumina ini merupakan senyawa kimia dengan rumus kimia Al_2O_3 . Material ini memiliki titik lebur pada suhu 2072°C dan mampu mempertahankan kekuatannya hingga suhu 1500°C sampai 1700°C (George, 2003). Material ini juga memiliki *wear resistance* yang baik serta nilai kekerasan yang cukup tinggi.

Stabilitas kimia dan termal, kekuatan yang relatif baik, karakteristik isolasi termal dan listrik yang dikombinasikan dengan ketersediaan yang melimpah telah membuat aluminium oksida Al_2O_3 , atau alumina, menarik untuk aplikasi rekayasa. Alumina memiliki beberapa bentuk alotropik, tetapi hanya tipe biasa atau α -alumina yang dipertimbangkan. Alumina memiliki struktur kristal internal dimana ion oksigen dikemas dalam susunan heksagonal tertutup (cph) yang dikemas dekat dengan ion aluminium (dan logam lainnya) dalam dua pertiga dari bentuk oktahedral (Auerkari, 1996)

Alumina merupakan salah satu penguat pada *metal matrix composite* yang tergolong pada material keramik. Seperti halnya material keramik lainnya, alumina memiliki sifat tahan aus yang baik karena memiliki nilai kekerasan yang baik pula. Ketahanan aus dapat dilihat dari nilai laju keausannya, semakin kecil nilai laju keausan maka dapat dikatakan material tersebut memiliki ketahanan aus yang baik. Selain itu, alumina juga memiliki sifat tahan terhadap korosi, titik lebur yang cukup tinggi, konduktivitas termalnya yang rendah dan tahan terhadap temperatur lingkungan yang tinggi. Untuk aplikasi pemakaian yang berhubungan dengan gesekan khususnya yang membutuhkan gaya gesek yang besar, maka aluminium dengan penguat alumina merupakan pilihan yang tepat.

2.4 Centrifugal Casting

Pengecoran sentrifugal (*centrifugal casting*) dilakukan dengan menuangkan logam cair ke dalam cetakan yang berputar. Akibat pengaruh gaya sentrifugal logam cair akan terdistribusi ke dinding rongga cetak dan kemudian membeku (Wei, 2008). Proses pengecoran sentrifugal dilakukan dengan jalan menuangkan logam cair ke dalam cetakan yang berputar, baik secara vertikal maupun horizontal. Pengecoran sentrifugal memanfaatkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh cetakan yang berputar, baik pada lengan pemegangnya ataupun pada sumbunya, untuk mendorong logam

cair menjauhi sumbu putar dan menuju jari-jari terjauh cetakan. Hal ini akan menghasilkan keadaan seakan-akan penuangan logam cair disertai dengan pemberian tekanan, yang menghasilkan pengisian rongga cetakan yang lebih sempurna dan akurasi tinggi serta dihasilkan produk coran yang lebih mampat daripada pengecoran dengan cetakan statis. Bantuan gaya sentrifugal mempermudah pengisian rongga cetak yang sempit dan kompleks secara merata dan seragam pada seluruh bagian (Wei, 2008). Dorongan logam cair yang dihasilkan oleh gaya sentrifugal ini membantu mengurangi cacat *shrinkage* yang umum terjadi pada saat pembekuan berlangsung. Hal ini karena logam cair akan terus terdorong dan mengisi kekosongan yang disebabkan oleh penyusutan. Cetakan yang digunakan untuk pengecoran sentrifugal umumnya tidak memiliki *riser*. Meminimalkan penggunaan riser ini akan meningkatkan efisiensi dari penggunaan logam cor, serta mengurangi waktu, tenaga, dan biaya yang diperlukan untuk proses pemesinan setelah pengecoran. Proses pengecoran sentrifugal dapat dikategorikan menjadi 3 metode (Wei, 2008), yaitu:

1. *True centrifugal* (sentrifugal sejati)
Pada *centrifugal casting*, cetakan permanen diputar pada kecepatan tinggi bersamaan dengan penuangan logam cair pada sumbu putarnya. Logam cair yang masuk akan terlempar ke sisi luar cetakan dan menciptakan benda berongga yang simetri. Proses ini hanya dapat memproduksi bentuk silinder seperti pipa. Material yang dapat dibuat melalui proses pengecoran sentrifugal sejati ini adalah besi, baja, *stainless steel*, aluminium, tembaga, dan nikel.
2. *Semicentrifugal* (semi-sentrifugal)
Pengecoran semi sentrifugal memanfaatkan gaya sentrifugal untuk mengisi cetakan simetris yang diputar pada sumbu vertikal. Penuangan dilakukan melalui sebuah lubang tuang yang diposisikan pada sumbu putar. Cetakan yang digunakan dapat berupa *permanent mold* atau *expandable mold*. Kecepatan putar dari pengecoran ini lebih rendah

daripada jenis pengecoran sentrifugal sejati. Proses ini biasanya digunakan untuk membuat *pulley*, roda gigi, baling-baling, dan benda sejenisnya.

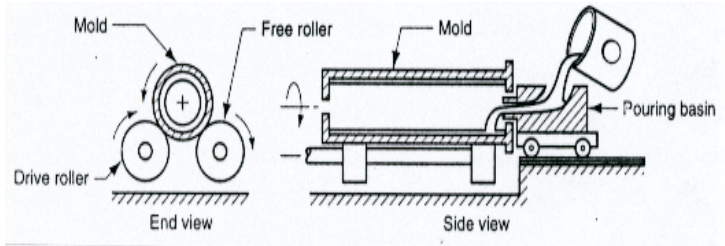
3. *Centrifuge*

Proses *centrifuge* ini umum digunakan untuk membantu penuangan cetakan *investment* yang berbentuk rumit. Gaya sentrifugal yang diperoleh dari lengan yang berputar dimanfaatkan untuk mendorong logam cair mengisi cetakan yang memiliki bentuk kompleks. Kecepatan putar disesuaikan dengan kekuatan cetakan serta kebutuhan. Untuk cetakan yang memiliki rongga sempit dan banyak, maka diperlukan gaya sentrifugal (kecepatan putar) yang lebih besar.

Gaya sentrifugal dari proses pengecoran sentrifugal mampu menghasilkan benda dengan struktur logam yang memiliki butiran lebih kecil daripada pengecoran statis. Gaya sentrifugal juga menyebabkan pembekuan terjadi dari jari-jari terluar cetakan menuju sumbu putarnya sehingga menghasilkan pembekuan terarah yang lebih ideal daripada pengecoran statis. Struktur mikro dan kepadatan yang lebih baik akan meningkatkan sifat mekanik hasil coran (Nayiroh, 2013).

Selain segi positif, pengecoran sentrifugal juga memiliki beberapa sisi negatif atau keterbatasan. Dengan adanya tekanan pada logam cair, maka cetakan yang digunakan harus mampu menahan tekanan logam cair agar permukaan logam cetakan tidak pecah saat dilakukan penuangan. Tekanan pada logam cair juga menyebabkan logam cair mengalir dengan kecepatan yang jauh lebih tinggi dari pengecoran secara gravitasi. Kecepatan aliran yang tinggi ini akan menyebabkan tingkat erosi aliran logam meningkat. Hal ini menuntut cetakan memiliki ketahanan permukaan yang cukup kuat untuk menahan erosi akibat aliran logam. Penyempitan saluran logam cair menyebabkan bertambahnya kecepatan alir, oleh karenanya untuk membuat benda yang memiliki banyak rongga tipis, diperlukan cetakan yang

kuat. Pada penelitian ini digunakan jenis pengecoran sentrifugal sejati yang ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.9. yaitu pengecoran sentrifugal sejati horisontal.



Gambar 2.9 *True Centrifugal Casting*

Gaya sentrifugal didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada massa yang berputar pada suatu sumbu dengan arah menjauhi sumbu putar. Besarnya gaya sentrifugal yang dialami oleh sebuah benda dirumuskan sebagai:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Berdasarkan prinsip kinematika, hubungan kecepatan *angular* dengan kecepatan *tangensial* dirumuskan sebagai:

$$v = \omega \times r$$

Dengan mensubstitusi dua persamaan diatas maka akan diperoleh:

$$F = m\omega^2 r$$

Dimana: F = gaya sentrifugal (N)

m = massa benda (kg)

r = radius putar (m)

ω = kecepatan *angular* (rad/s)

v = kecepatan *tangensial* (m/s)

Sesuai dengan rumus persamaan diatas, maka besarnya gaya sentrifugal pada *centrifugal casting* bergantung pada massa logam cair, kecepatan putar cetakan dan radius cetakan.

Selain itu pada centrifugal casting kecepatan putar sangat berpengaruh terhadap ketebalan produk yang dihasilkan. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan kecepatan putar agar dihasilkan produk dengan ketebalan yang diinginkan. Kecepatan putar dapat dihitung melalui perumusan sebagai berikut:

$$N = 42,3 \left(\frac{G \text{ factor}}{D} \right)^{1/2}$$

Dimana:

N = Kecepatan putar (rpm)

$G \text{ factor}$ = faktor gaya normal gravitasi selama berputar

D = *Rotational Diameter*

Sesuai dengan rumus diatas, maka besarnya kecepatan putar pada centrifugal casting bergantung pada $G \text{ factor}$ dan *rotational diameter*. (ASM, 1990)

2.5 Cacat Pengecoran

Cacat pengecoran dapat didefinisikan sebagai karakteristik yang menyebabkan suatu material hasil coran tidak efisien serta timbulnya ketidaksempurnaan terhadap spesifikasi kualitas yang dibutuhkan dan dirancang (Patil, 2015). Pada pengecoran sentrifugal pertama-tama logam yang sudah dilebur dituang kedalam cetakan, berbentuk silinder, yang berputar hingga logam

cair tersebut tersolidifikasi. Setelah proses solidifikasi selesai biasanya akan ditemukan beberapa cacat seperti *segregation*, *blow hole*, *porosity*, dan lain lain. Cacat-cacat pengecoran ini disebabkan oleh proses yang tidak optimal, kegagalan material dan peralatan pengecoran sehingga cacat coran dapat diperbaiki dan ditoleransi. sesuai dengan bentuk klasifikasi cacat pengecoran dapat dikelompokkan berdasarkan sumber penyebabnya (Patil, 2015). Oleh karena itu, cacat pengecoran sentrifugal dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

2.5.1 Cacat Metalurgi

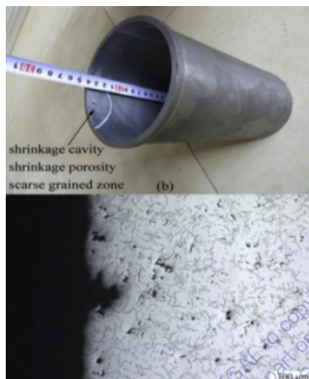
Cacat metalurgi disebabkan karena komposisi paduan yang tidak sesuai, temperatur peleburan yang tidak tepat serta sifat mekanik suatu material yang sudah cacat sebelum dilakukan pengecoran sentrifugal, selain itu tegangan internal juga dapat memicu munculnya cacat metalurgi (Patil, 2015). Contoh cacat metalurgi adalah: *porosity*, *shrinkage*, *dross*, *bi-film*, *inclusion*, *lumps*.

1. *Porosity* atau porositas dapat didefinisikan sebagai fenomena adanya kekosongan dalam hasil pengecoran. Porositas dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *gas porosity* dan *shrinkage porosity*. *Gas porosity* atau gas porositas adalah fenomena kemunculan gas yang terjebak didalam hasil pengecoran. Cacat ini berasal dari hidrogen yang berada pada udara sekitar serta uap air dari pelumas. Gambar 2.10 merupakan salah satu contoh spesimen yang mengalami cacat porositas.



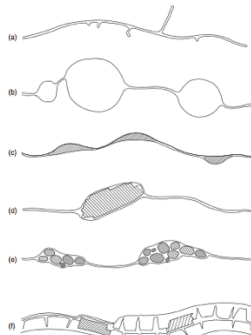
Gambar 2.10 Gas Porosity

2. *Shrinkage porosity* merupakan suatu cacat yang paling sering dijumpai pada pengecoran aluminium. Cacat ini didefinisikan sebagai keretakan internal yang disebabkan dari berbagai sumber. *Shrinkage* merupakan cacat pengecoran akibat pembentukan rongga karena kurang meratanya logam cair pada cetakan saat proses pengecoran (Juriani, 2015). Gambar 2.11 merupakan contoh spesimen yang mengalami cacat *shrinkage porosity*.



Gambar 2.11 *Shrinkage Porosity*

- 3 *Bi-film* merupakan lapisan oksida tipis pada permukaan aluminium cair yang terlipat masuk ke dalam cairan aluminium akibat olakan dengan sedikit gas diantara lipatnya (Gambar 2.12). *Bi-film* dapat terisi berbagai macam inklusi seperti gas flux, kotoran, pasir cetakan dan oksida lama. Alat bantu peleburan yang masuk ke dalam aluminium cair dapat dengan mudah membentuk *bi-film* baru.



Gambar 2.12 Macam-macam *Bi-film*: (a) Bi-film baru (b) gelembung gas (c) *flux* (d) kotoran tungku (e) pasir cetakan (f) oksida lama

4. Inklusi terjadi akibat munculnya partikel non-metallic dalam logam coran. Partikel-partikel ini muncul dalam bentuk berupa oksida, *slag*, kotoran, pasir dll seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Inklusi dapat menyebabkan berkurangnya sifat mekanis dan sifat *fatigue wear* pada material hasil coran. (Patil, 2015)



Gambar 2.13 Inklusi

5. *Dross* adalah padatan yang mengambang dalam logam cair. *Dross* terjadi akibat perbedaan densitas antara logam cair dengan logam dinding cetakan. (Juriani,

2015) Contoh permukaan material yang mengalami *dross* dapat dilihat pada gambar 2.14



Gambar 2.14 *Dross*

- 6 *Lumps* merupakan cacat berbentuk benjolan yang terjadi pada benda pengecoran silinder atau tubular yang diberi tekanan sentrifugal (Juriani, 2015). Karena adanya udara yang terjebak diantara cetakan dan logam cair seperti yang terlihat pada gambar 2.15.

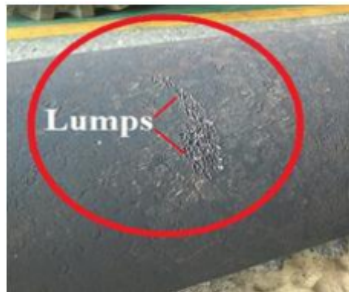


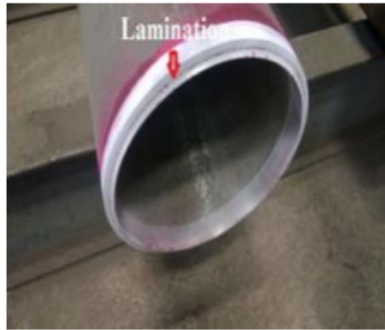
Fig 10 Lumps

Gambar 2.15 *Lumps*

2.5.2 Cacat Akibat Panas/Cacat Termal

Cacat termal terjadi akibat tegangan panas, interaksi yang tidak dengan sebuah fluida serta laju pemotongan yang tidak sesuai saat dilakukan *machining* pada hasil benda pengecoran. Contoh cacat pengecoran sentrifugal akibat panas adalah: *lamination defects*.

1. *Lamination Defect* adalah cacat yang sebagian besar terjadi pada pipa hasil pengecoran sentrifugal terutama pada pipa dengan material stainless steel. Cacat ini divisualisasikan sebagai lapisan pipa yang dipisahkan dari lapisan aslinya dan muncul sebagai lapisan laminasi yang menonjol (Juriani, 2015) seperti yang terlihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Lamination Defect*

2.5.3 Cacat Mekanis

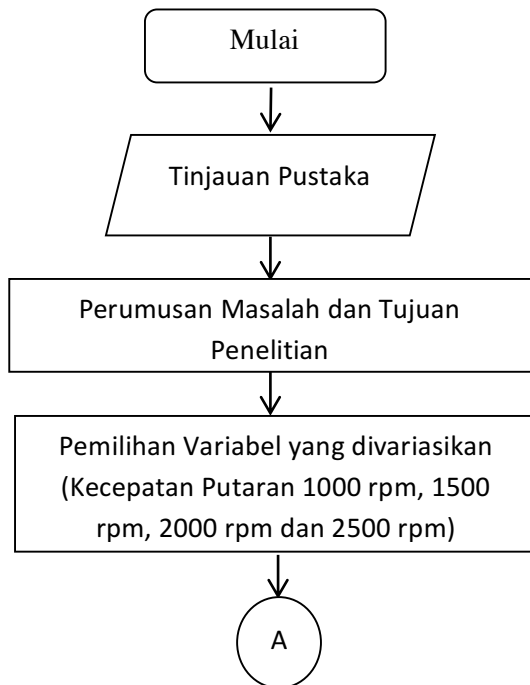
Cacat mekanis terjadi akibat sudut yang tidak sesuai. Contoh cacat mekanis adalah: *surface marks*, *bending undercuts*. Undercuts terjadi akibat erosi sebuah pasir dari aliran logam cair yang menyebabkan adanya kotoran pada hasil pengecoran. *Bending* dan *surface marks* terjadi akibat pembebanan dari luar serta metode injeksi logam cair yang tidak sesuai. Cacat ini dapat dihindari dengan cara mendesain dan memodifikasi sistem saluran pengecoran (Patil, 2015)

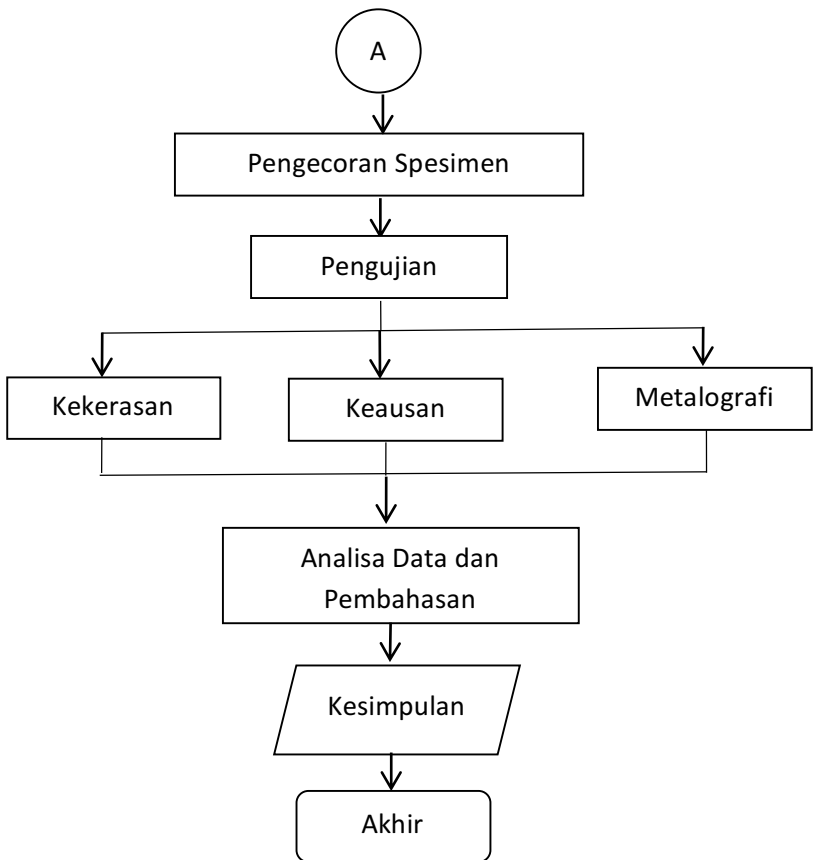
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Perancangan Eksperimen

Langkah-langkah dalam melakukan penelitian ini digambarkan secara singkat dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Langkah-langkah Penelitian

Sehubung dengan diagram alir pada gambar 3.1, dalam melaksanakan penelitian tugas akhir ini serangkaian kegiatan penelitian akan dideskripsikan serta dikelompokkan menjadi

beberapa tahapan agar penelitian dapat berjalan dengan baik dan sistematis. Adapun tahapan-tahapan yang ada pada penelitian ini adalah tahapan persiapan, tahap pengambilan data, dan tahap pengolahan data

3.2.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan adalah tahapan yang dilakukan pertama kali sebelum penelitian berjalan lebih jauh. Adapun persiapan-persiapan yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

- Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses ulasan terhadap buku dan jurnal yang mendukung dalam memberikan informasi yang terkait dengan penelitian ini. Hal ini termasuk mengumpulkan referensi materi kuliah pendukung untuk digunakan sebagai acuan atau pustaka. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan teori proses dan eksperimen dengan AMC, pengecoran sentrifugal (*centrifugal casting*), sifat mekanik kekerasan AMC. Menentukan parameter-parameter dalam melakukan penelitian seperti material yang digunakan adalah aluminium seri ADC12, fraksi Al_2O_3 (alumina) sebagai penguat sebanyak 20% dari berat total AMC yang akan dicor, hal ini mengacu pada hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya bahwa nilai kekerasan terbaik sebuah AMC dihasilkan pada fraksi 20% (Alief, 2015)

- Perumusan Masalah dan Tujuan

Dalam tahapan ini, perumusan masalah disertai dengan penetapan tujuan penelitian untuk memperjelas lingkup penelitian, kemudian diikuti dengan penetapan batasan dari penelitian yang akan dilaksanakan.

3.2.2 Tahap Pengambilan Data

Tahap pengambilan data adalah tahapan yang dilakukan dalam rangka untuk memperoleh beberapa data yang terkait dengan kasus yang akan diteliti agar penelitian dapat berjalan dengan

baik dan mencapai tujuan yang telah dirumuskan dalam tahap persiapan. Adapun aktivitas-aktivitas penelitian yang berupa pengamatan dan pengujian yang tergolong dalam tahap pengambilan data adalah:

- Proses Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan untuk mendapatkan spesimen yang akan diteliti. Pengecoran dilakukan dengan metode pengecoran sentrifugal. Pengecoran ini dilakukan dengan cara menuangkan logam cair bercampur alumina yang sudah dilebur sebelumnya pada tungku furnace ke dalam cetakan yang diputar dengan kecepatan konstan hingga logam cair tersebut dingin. Pada saat proses penuangan temperatur diatur sebesar 850°C serta fraksi alumina yang dicampurkan sebesar 20%. Setelah produk logam hasil coran dingin, produk dikeluarkan dari cetakan lalu diamati dan dianalisa hasilnya. Langkah-langkah ini diulang dengan memvariasikan kecepatan rpm putarannya yaitu sebesar 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm dan 2500 rpm.

- Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makroskopik dilaksanakan dengan menggunakan bantuan kamera digital untuk mendapatkan bentuk penampakan benda kerja yang akan diteliti.

- Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material. Pada penelitian kali ini hanya dilakukan pengujian kekerasan.

- Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi diawali dengan beberapa persiapan yang meliputi pemotongan spesimen, *grinding*, *polishing*, dan *etching*. Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material tersebut. Pemeriksaan terhadap adanya kecacatan pada struktur mikro dapat dilaksanakan dengan mengetahui bentuk dan profil struktur mikro dari spesimen uji.

Spesimen uji yang diteliti terlebih dahulu dipotong penampangnya secara membujur dan melintang.

3.2.3 Tahap Pengolahan Data

Setelah didapatkan beberapa data terkait melalui tahap pengambilan data, dilakukan tahapan berikutnya, yaitu tahap pengolahan data. Pengolahan data dilakukan dengan menganalisa data-data yang ada kemudian diikuti dengan merumuskan kesimpulan dari penelitian yang mengacu pada tujuan yang telah dirumuskan pada tahap persiapan. Adapun aktivitas-aktivitas yang tergolong dalam tahap pengolahan data adalah:

- **Analisa Data**

Analisa data digunakan untuk mengolah data-data yang telah didapat, sehingga dapat menjawab tujuan yang telah ditetapkan.

- **Kesimpulan dan Saran**

Di akhir penelitian, setelah dilakukan pengolahan data-data yang didapat, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Kemudian dari kesimpulan yang didapat tersebut, dirumuskan rekomendasi dan saran.

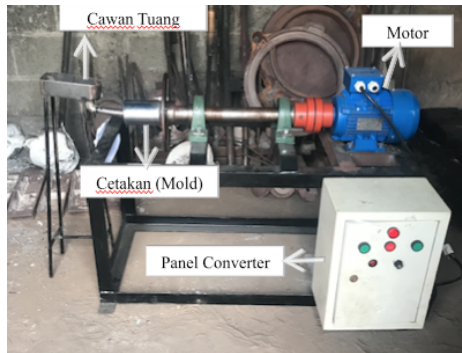
3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Dalam penelitian ini proses pembuatan aluminium matrix composite menggunakan metode *centrifugal casting*. Alat yang digunakan adalah:

1. *Mesin Centrifugal Casting*

Centrifugal casting atau pengecoran sentrifugal merupakan metode pengecoran dengan cara menuang logam cair kedalam cetakan yang berputar



Gambar 3. 2 *Centrifugal Casting*

2. Tungku *Crucible*

Tungku *crucible* merupakan salah satu jenis tungku dengan sistem pemanasan tidak langsung (*indirect fuel fired furnace*). Fungsi utamanya untuk melebur logam aluminium dan sejenisnya. Peleburan logam dilakukan dengan menggunakan krusibel yang dipanaskan bagian luarnya secara konduksi melalui dinding krusibel dengan sumber panas dari kayu bakar.



Gambar 3. 3 *Tungku Crucible*

3. *Ladle*

Ladle (cawan tuang) digunakan untuk wadah aluminium cair yang telah dicairkan dan dicampur dengan Al_2O_3 selain itu *ladle* merupakan alat untuk menyalurkan logam cair yang telah dicairkan dalam tungku krusibel menuju cetakan melalui saluran penuangan (*pouring basin*)



Gambar 3. 4 *Ladle*

4. Timbangan *digital*

Timbangan *digital* digunakan untuk menimbang berat spesimen yang memerlukan ketelitian tinggi dan untuk menimbang berat paduan aluminium yang akan dicor.



Gambar 3. 5 Timbangan *Digital*

5. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur tuang logam cair yang akan dituang kedalam cetakan.



Gambar 3. 6 *Thermocouple*

6. *Mesin Grinding dan Polishing*

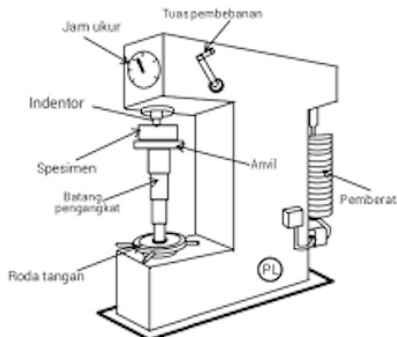
Mesin *grinding* dan *polishing* ini digunakan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen. Sehingga dapat digunakan dalam pengamatan struktur mikro, dan uji kekerasan. Spesimen diratakan dengan menggunakan amplas dari grid 180 s/d 2000.



Gambar 3. 7 *Mesin Grinding dan Polishing*

7. *Mesin Uji Kekerasan*

Pengujian kekerasan menggunakan metode brinell dengan menggunakan mesin uji FRANK. Indentor yang dipakai adalah bola baja. Gambar 3.8 dibawah ini merupakan skema alat pengujian kekerasan.



Gambar 3. 8 Mesin Uji Kekerasan

8. Alat bantu lain

Alat bantu lain yang digunakan adalah jangka sorong, penjepit/tang tachometer, gerinda potong, mikroskop.

3.3.2 Bahan

Bahan baku yang digunakan dalam proses pembuatan aluminium matrix composite sebagai berikut:

1. Aluminium *Ingot*

Material yang akan digunakan sebagai logam pengisi atau logam cair yaitu Aluminium ADC12 seperti yang ditunjukkan gambar 3.9



Gambar 3. 9 Aluminium ADC12

2. *Aluminium Oxide* (Al_2O_3)

Aluminium oxide yang dipilih adalah ukuran butirnya 1 mikron. Dapat dilihat dari gambar 3.10



Gambar 3. 10 Bubuk *Aluminium Oxide* (Al_2O_3)

3.4 Pembuatan *Aluminium Matrix Composite*

3.4.1 Proses Centrifugal Casting

1. Persiapan material serta cetakan coran yang akan digunakan
2. Aluminium yang telah dipotong kecil kemudian ditimbang sesuai variabel pengujian yang telah ditentukan
3. Al_2O_3 ditimbang sesuai variabel pengujian yang telah ditentukan yaitu sebesar 20% dari fraksi volume
4. Al_2O_3 yang telah ditimbang selanjutnya dibungkus dengan aluminium *foil*
5. Aluminium dimasukkan kedalam *ladle* dan dilebur pada suhu 850°C
6. Setelah aluminium cair sepenuhnya pada suhu 950°C , partikel Al_2O_3 yang telah dibungkus aluminium *foil* dimasukkan kedalam *ladle* yang berisi aluminium cair

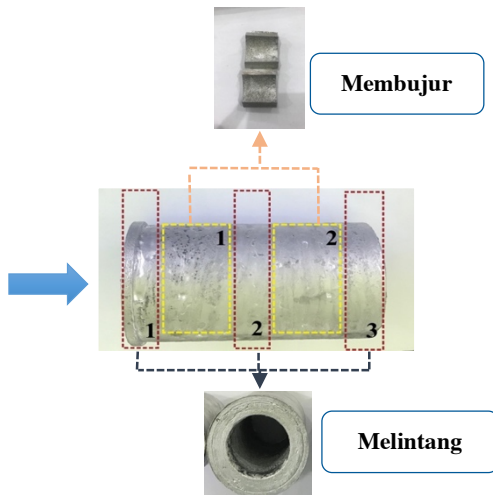
7. Paduan Aluminium cair dan Al_2O_3 dituang kedalam cetakan yang berputar dengan variasi kecepatan 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm dan 2500 rpm.
8. Cetakan *centrifugal casting* terus berputar hingga komposit Al- Al_2O_3 membeku
9. Komposit Al- Al_2O_3 yang telah mengeras dikeluarkan dari cetakan
10. Komposit Al- Al_2O_3 kemudian dipotong secara membujur dan melintang untuk dilakukan pengujian lalu dianalisa dan dibahas untuk ditarik kesimpulan.

3.5 Pengujian Spesimen

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian dan pengamatan terhadap spesimen yang telah dihasilkan, yaitu:

3.5.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metode Brinnel dengan menggunakan mesin uji FRANK. Indentor yang dipakai adalah bola baja dengan diameter 2,5 mm. Pembebanan yang diberikan adalah 62,5 kP. Untuk menguji kekerasannya maka spesimen terlebih dahulu dipotong menjadi 3 bagian yang masing-masing bagian diambil secara membujur dan melintang untuk melihat persebaran partikel alumina seperti ilustrasi gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Ilustrasi Pemotongan Spesimen

3.5.2 Pengamatan Struktur Mikro/Metalografi

Pengamatan struktur mikro ini menggunakan spesimen uji kekerasan. Selanjutnya spesimen dipreparasi dengan menggunakan prosedur metalografi standar yang melibatkan *grinding* dan *polishing*. Struktur mikro dari spesimen tersebut diamati dengan menggunakan mikroskop optis yang dilengkapi dengan kamera *digital*. Morfologi yang terlihat pada spesimen akan dianalisa dan dibahas secara menyeluruh. Tabel 3.1 dibawah ini merupakan contoh tabel pengamatan uji kekerasan dan uji metalografi

No	RPM	Spesimen		Titik	Nilai Kekerasan	BHN (avg)	K (mm ³ /Nm)
1	1000	Membujur	1	1			
				2			
				3			
			2	1			
				2			
				3			
			3	1			
				2			
				3			
		Melintang	1	1			
				2			
				3			
			2	1			
				2			
				3			
			3	1			
				2			
				3			

(a)

No	Variasi Kecepatan (RPM)	Spesimen	Potongan Bagian 1	Potongan Bagian 2	Potongan Bagian 3
1	1000	Membujur			
		Melintang			
2	1500	Membujur			
		Melintang			
3	2000	Membujur			
		Melintang			
4	2500	Membujur			
		Melintang			

(b)

Tabel 3. 1 Contoh Tabel Pengamatan (a) Uji Mekanik (Kekerasan dan Keausan) dan (b) Uji Metalografi

3.5.3 Pengujian Keausan

Pengujian keausan menggunakan metode tribometer pin on disk dengan *dry sliding* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.12. Spesimen yang digunakan dalam pengujian keausan memiliki bentuk silinder dengan diameter bertingkat. Pembuatan spesimen uji dilakukan dengan di *machining*. Selanjutnya diberikan pembebanan sebesar 1,5 kg dengan cara memutar pegas dengan *pin holder* ke permukaan piringan. Permukaan spesimen akan bersentuhan dengan piringan dengan baja paduan yang memiliki standard AISI D2/DIN 2379 berdiameter 100 mm dan tebal 15 mm

serta memiliki nilai kekerasan 55-62 HRC sebagai bahan gesekan untuk spesimen uji. Kemudian motor dinyalakan dan mengatur *speed control* untuk mendapatkan kecepatan tertentu guna untuk menentukan waktu yang dibutuhkan untuk menempuh jarak 1000 m. Setelah mencapai *sliding distance* 1000 m, motor dimatikan kemudian spesimen uji ditimbang untuk mengetahui perbedaan berat sebelum dan sesudah dilakukan pengujian keausan. Satuan yang digunakan untuk pengujian keausan kali ini adalah volume per jarak dan gaya.



Gambar 3. 12 Alat Uji Keausan *Pin On Disc*

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Setelah proses pembentukan spesimen seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 oleh pengecoran metode sentrifugal, maka dilakukan pengujian mekanik berupa uji kekerasan dan uji keausan. Selain itu akan dilakukan pengujian metalografi untuk didapatkan gambar struktur mikro serta persebaran distribusi alumina pada komposit. Data hasil pengujian yang telah didapatkan selanjutnya akan dijadikan sebagai pedoman untuk proses analisa selanjutnya. Analisa dimulai dari komposisi kimia matriks, kemudian dilanjutkan untuk diamati cacat coran yang timbul kemudian dihubungkan dengan sifat mekanik produk berupa kekerasan dan ketahanan aus.



Gambar 4. 1 Spesimen *Metal Matrix Composite* Produk Pengecoran Sentrifugal

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian *spectrometry* atau pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui jenis matriks aluminium yang digunakan. Dari data pengujian komposisi kimia didapatkan komposisi paduan yang dikandung matriks aluminium sehingga dapat ditarik kesimpulan maupun ditentukan jenis grade

aluminium. Pengujian komposisi kimia dilakukan oleh pabrik penyuplai ingot ADC12. Komposisi kimia standar dari paduan ADC12 ditulis pada dokumen JIS H 5302. Komposisi kimia material ingot yang didapatkan dari hasil spektrometer dan standar komposisi kimia pada ADC12 berdasarkan JIS H 5302 dituliskan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Komposisi Kimia Hasil Uji Spectrometer, dan Komposisi Kimia Standar JIS H 5302

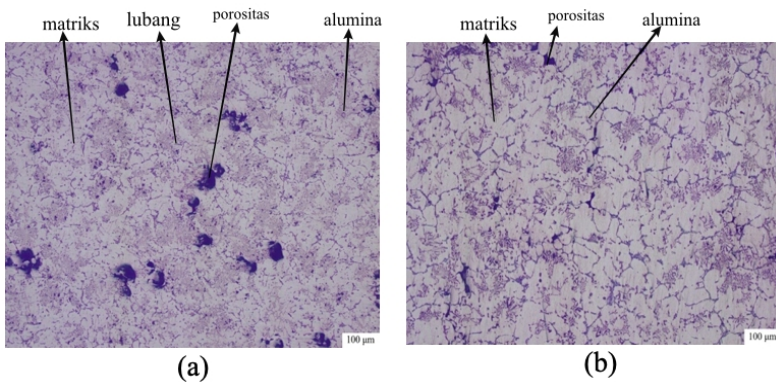
Elemen Paduan	Hasil Uji Spectrometer (% wt)	Standar JIS H 5302 (% wt)
Cu	1.81	1.5-3.5
Si	10.54	9.6-12.0
Mg	0.26	0.3 maksimal
Zn	0.85	1.0 maksimal
Fe	0.87	1.3 maksimal
Al	85.67	Sisa

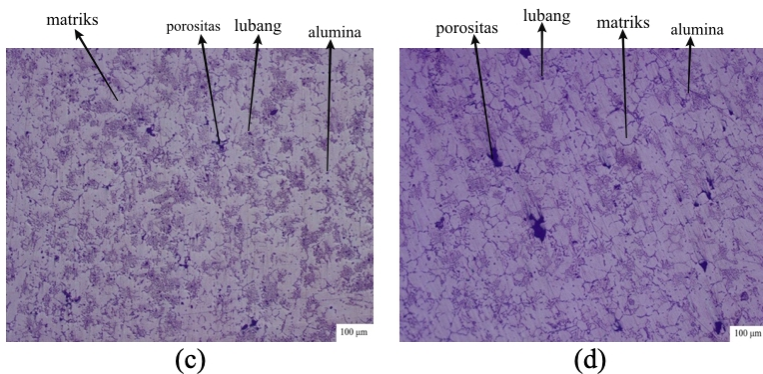
Didapatkan hasil uji yang menunjukkan bahwa ingot yang digunakan memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan standar komposisi kimia paduan ADC12 berdasarkan JIS H5302. Dengan mengetahui komposisi kimia matriks, maka akan mempermudah dalam menganalisa sifat-sifat matriks. Khususnya karakteristik matriks pada partikel penguat. Karena perbedaan kandungan unsur

dalam matriks akan sangat mempengaruhi sifat mekanik produk *metal matrix composite* itu sendiri. Setelah didapatkan data bahwa matriks mempunyai kadar kemurnian aluminium yang tinggi, maka analisa berikutnya dapat menjadi lebih fokus kepada pengaruh alumina dalam matriks aluminium. Sedangkan karakteristik alumina atau penguat kepada unsur lainnya dapat diabaikan karena presentase unsur terlarut sangat kecil. Larutan etsa hanya mengenai matriks, sehingga persebaran alumina dapat dilihat.

4.2 Metalografi

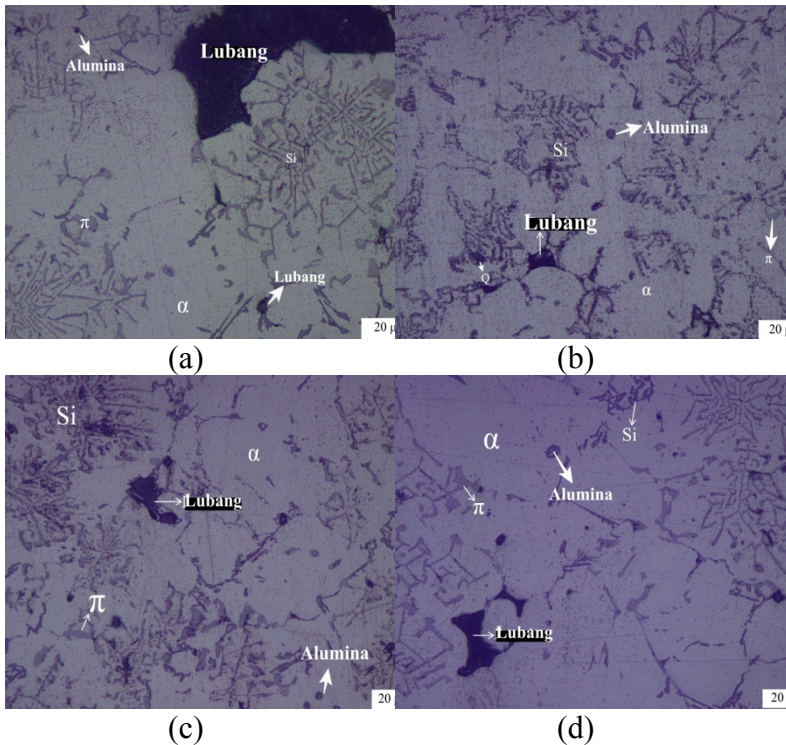
Persiapan spesimen untuk pengambilan gambar mikrostruktur dilakukan pada 4 jenis variasi spesimen yang masing-masing dibedakan kecepatan putarannya yaitu pada kecepatan putaran sebesar 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm dan 2500 rpm dengan lama pengadukan didalam pengecoran sentrifugal selama 10 menit. Selanjutnya semua jenis spesimen dipotong menjadi 3 bagian seperti pada gambar 3.11. Diambil 2 gambar dengan perbesaran yang berbeda di tiap lokasi yaitu perbesaran 100x, dan 500x.





Gambar 4. 2 Struktur Mikro *Aluminium Matrix Composite* dengan variasi kecepatan putaran (a) 1000 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2000 rpm dan (d) 2500 rpm dengan Perbesaran 100x (*sample* potongan bagian 2 membujur)

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *aluminium matrix composite* produk pengecoran sentrifugal dengan variasi kecepatan putaran sebesar 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm dan 2500 rpm. Setiap potongan diteliti secara membujur dan melintang untuk dilihat persebaran alumina. Lalu spesimen yang telah *digrinding* dan dipoles selanjutnya akan dietsa menggunakan *Keller Reagent* dengan komposisi 2,5 mL HNO₃, 1,5 mL HCL, 1 mL HF dan 95 mL aquades. Spesimen dicelupkan kedalam larutan etsa selama 5 detik setelah itu spesimen dibilas menggunakan alkohol 96%. Untuk memperjelas struktur mikro supaya lebih mudah untuk diamati, dilakukan pengambilan gambar dengan perbesaran 500x yang ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Struktur Mikro *Aluminium Matrix Composite* dengan variasi kecepatan putaran (a) 1000 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2000 rpm dan (d) 2500 rpm dengan Perbesaran 500x (*sample* potongan bagian 2 membujur)

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada gambar 4.3. Terlihat beberapa lubang sebesar partikel alumina pada matriks berwarna hitam yang merupakan *void* atau kekosongan. Selain itu terlihat fasa seperti α -Aluminium, Silikon Eutektik, fasa π yaitu

$\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ dan fasa Q yaitu $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ (Noventio, 2018). Lubang atau void yang tampak diakibatkan bekas melekatnya alumina atau partikel penguat yang kemudian terlepas karena proses *machining* seperti *grinding* dan *polishing*. Lepasnya alumina dari permukaan produk terjadi karena lemahnya ikatan *interface* antara alumina yang berfungsi sebagai penguat dengan aluminium yang berperan sebagai matriks. Terdapat dua macam ikatan *interface* (antarmuka) pada *metal matrix composite* yaitu *mechanical bonding* dan *chemical bonding* (Chawla, 2006). Ikatan *interface* ini berperan penting terhadap sifat mekanis pada *metal matrix composite*. Aluminium yang berfungsi sebagai matriks memiliki koefisien termal ekspansi yang lebih besar daripada alumina yang berfungsi sebagai penguat sehingga aluminium mengalami penyusutan yang lebih cepat jika dibandingkan dengan alumina jika didinginkan dari suhu tinggi. Fenomena ini menyebabkan terjadinya pencengkraman mekanik antara aluminium dengan alumina. *Mechanical bonding* ini memiliki energi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan energi pada *chemical bonding*. Pada studi kali ini tidak terjadi *chemical bonding* (ikatan kimia), sehingga partikel alumina akan lepas saat kekasaran permukaan semakin menurun. Ikatan kimia akan menimbulkan *interface* yang mempunyai senyawa baru seperti dalam daftar tabel 4.3. Minimnya ikatan kimia menyebabkan partikel alumina mudah lepas pada permukaan matriks ketika proses *machining*.

Tabel 4. 2 Hasil Reaksi *Interfacial* pada *Chemical Bonding* (Chawla, 2006)

Reinforcement	Matrix	Reaction Product(s)
SiC	Ti alloy	TiC, Ti_5Si_3 ,

	Al alloy	Al_4C_3
Al_2O_3	Al alloy	None
Al_2O_3	Mg alloy	MgO , MgAl_2O_4 (<i>spinnel</i>)
B	Al alloy	AlB_2
ZrO_2	Al alloy	ZrAl_3
C	Al alloy	Al_4C_3
C	Cu	None
W	Cu	None
NbTi	Cu	None
Nb₃Sn		
Various	Ag	None

Selain faktor ikatan *interface* (antarmuka) jumlah porositas dan lubang yang timbul berbanding lurus dengan kecepatan putaran karena semakin besar kecepatan maka gaya sentrifugal yang dihasilkan juga akan besar dimana gaya sentrifugal tersebut akan memampatkan hasil coran seperti yang dilakukan oleh penelitian terdahulu bahwa hasil pengecoran sentrifugal yang terbaik didapatkan apabila kecepatan putaran yang diaplikasikan semakin besar (Prabu, 2004). Hal ini disebabkan karena gaya sentrifugal yang dihasilkan semakin besar sehingga hasil coran

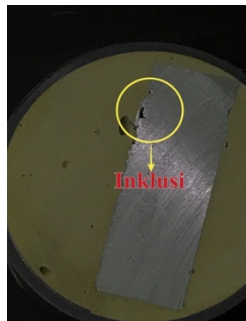
semakin termampatkan dan porositas yang terbentuk pun semakin sedikit.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 4 Cacat Coran (a) Porositas, (b) Shrinkage, (c) Inklusi

Pada gambar 4.4 dapat dilihat cacat berupa porositas yang muncul. Porositas sendiri merupakan cacat yang diakibatkan karena terperangkapnya gas atau uap air pada material hasil

pengecoran. Selain cacat porositas, nampak pula beberapa cacat pengecoran yang muncul pada spesimen hasil pengecoran sentrifugal antara lain *shrinkage* dan inklusi. Cacat *shrinkage* dapat ditunjukkan pada gambar 4.4 (b). Cacat ini didefinisikan sebagai keretakan internal yang disebabkan dari berbagai sumber. *Shrinkage* merupakan cacat pengecoran akibat pembentukan rongga karena kurang meratanya logam cair pada cetakan saat proses pengecoran (Juriani, 2015). Cacat yang terlihat pada gambar 4.4 (c) merupakan cacat inklusi. Cacat ini mirip dengan cacat porositas namun lokasinya berbeda yaitu pada *subsurface*, Inklusi terjadi akibat munculnya partikel non-metalic dalam logam coran. Partikel-partikel ini muncul dalam bentuk berupa oksida, *slag*, kotoran, pasir.

4.3 Pengujian Mekanik

4.3.1 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metode brinell dengan indentor 2,5 mm. Metode *brinell* dipilih agar kekerasan yang didapatkan berasal dari area yang heterogen. Sehingga ketika diuji tekan, partikel alumina juga terkena beban indentasi. Pada gambar 4.5 ditunjukkan contoh spesimen uji kekerasan dan uji keausan.



(a)

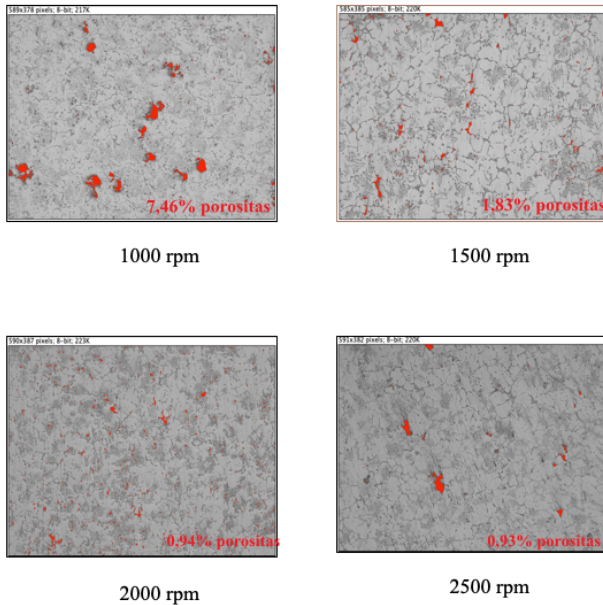


(b)

Gambar 4. 5 (a) Spesimen Uji Kekerasan dan (b) Spesimen Uji Keausan

Setelah didapatkan data hasil kekerasan dan keausan data dituangkan ke dalam tabel 4.3. Diperoleh kekerasan yang meningkat dari putaran 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm dan 2500 rpm. Kekerasan produk meningkat dikarenakan gaya sentrifugal pada pengecoran sentrifugal membantu memberikan tekanan pada logam cair hingga tersolidifikasi. Semakin besar putaran maka gaya sentrifugal yang dihasilkan juga semakin besar sehingga dihasilkan material dengan komposisi yang seragam. Hal ini juga akan menyebabkan porositas yang terbentuk semakin sedikit (Dyzia, 2012). Porositas dan lubang dapat dilihat pada gambar 4.3. Porositas akan menyebabkan pergerakan dislokasi matriks menjadi lebih mudah. Dislokasi yang mudah terjadi mengakibatkan diameter hasil indentasi semakin besar, sehingga nilai kekerasan menurun. Porositas yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 4.6. Dilakukan perhitungan jumlah porositas yang terbentuk dengan menggunakan aplikasi *ImageJ*. Bercak berwarna merah merupakan porositas. Perhitungan dilakukan dengan cara

menghitung rata-rata luas partikel porositas dengan luas keseluruhan penampang. Didapatkan hasil bahwa semakin tinggi kecepatan putaran maka porositas yang terbentuk semakin sedikit.



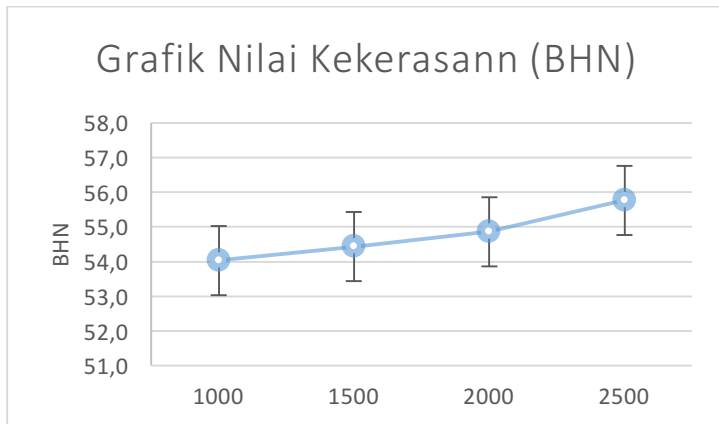
Gambar 4. 6 Persebaran Porositas Masing-masing Spesimen

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Kekerasan dan Keausan

No.	RPM	BHN (AVG)	K(mm3/NM)
1	1000	54,03	0,000320988
2	1500	54,43	0,000271605
3	2000	54,86	0,000246914
4	2500	55,76	0,000197531

Selain faktor porositas terdapat faktor lain berupa lepasnya partikel alumina di permukaan produk. Lepasnya alumina berkaitan dengan ikatan *interfacial zone* yang biasa disebut *bonding*. Partikel alumina yang lepas menyebabkan timbulnya lubang di permukaan produk. Lubang-lubang tersebut mempengaruhi permukaan indentasi. Sehingga lubang karena lepasnya alumina menjadikan dislokasi matriks semakin mudah. Pada dasarnya terdapat dua macam ikatan pada *interface* sebuah *metal matrix composite* yaitu *mechanical bonding* dan *chemical bonding*. (Chawla, 2006). Jenis ikatan yang terjadi juga jelas mempengaruhi bagaimana karakteristik *interface* nantinya. Pada *mechanical bonding*, kekasaran permukaan menjadi faktor penting dalam pembentukannya. Kekasaran permukaan ini menimbulkan penguncian di permukaan yang selanjutnya berikatan secara mekanik. *Interface* pada komposit yang bersifat halus hanya ada pada kondisi ideal, pada kenyataannya kekasaran *interface* sangat variatif yang selanjutnya menimbulkan *interlocking*. Dalam studi ini penguat alumina merupakan penguat jenis keramik, sedangkan aluminium adalah matriks metal. Matriks metal mempunyai koefisien ekspansi termal yang lebih tinggi daripada alumina. Sehingga matriks metal pada komposit akan

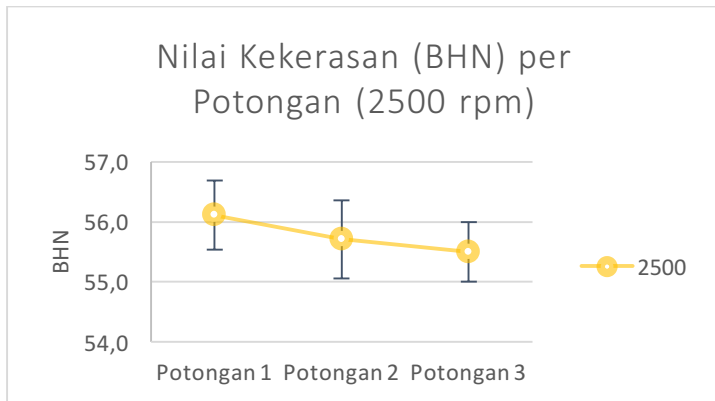
mengalami penyusutan secara radial lebih tinggi dibandingkan dengan keramik penguat saat didinginkan dari suhu tinggi. Hal ini akan menyebabkan pencengkraman secara mekanik oleh aluminium kepada alumina. Jadi *mechanical bonding* antara matriks yang berupa aluminium dengan alumina sebagai penguat bisa terbentuk dengan baik (Chawla, 2006).



Gambar 4. 7 Grafik Nilai Kekerasan

Pada gambar 4.6 menjelaskan grafik hasil uji kekerasan rata-rata pada AMC berdasarkan variasi kecepatan putaran pengecoran sentrifugal. Terlihat kecenderungan nilai kekerasan yang naik pada setiap variasi spesimen yaitu dari spesimen dengan variasi kecepatan sebesar 1000 rpm hingga spesimen dengan variasi kecepatan 2500 rpm. Keseragaman nilai kekerasan terjadi pada setiap bagian potongan masing-masing spesimen yang diteliti baik bagian 1, bagian 2 maupun bagian 3 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.7. Hal ini sudah sesuai dengan teori dan penelitian

terdahulu bahwa nilai kekerasan akan meningkat seiring dengan kecepatan putaran yang semakin tinggi (Prabu, 2004). Karena semakin tinggi kecepatan yang diaplikasikan maka gaya sentrifugal yang dihasilkan juga akan semakin besar sehingga hasil coran semakin mampat.

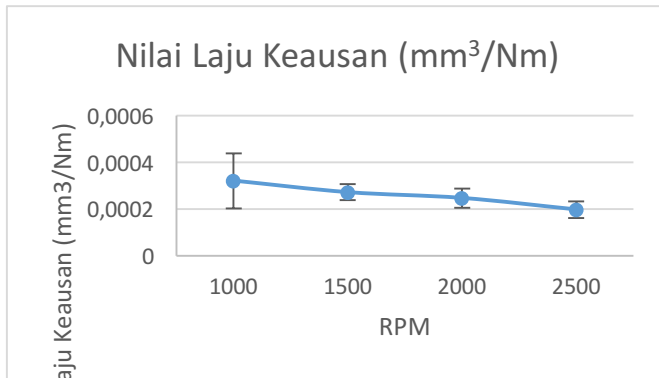


Gambar 4. 8 Nilai Kekerasan (BHN) Setiap Potongan (Contoh Potongan pada Variasi 2500 rpm)

4.3.2 Uji Keausan

Gambar 4.5 menunjukkan spesimen pengujian keausan dengan metode tribometer *pin on disc* dengan kekasaran permukaan pin 1,21 μm dan disk 0,74 μm . Hasil pengujian menunjukkan nilai laju keausan semakin menurun dari kecepatan putaran 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm hingga 2500 rpm. Penurunan nilai laju keausan sendiri sesuai dengan nilai kekerasan yang telah didapatkan. Penelitian ini menggunakan fraksi alumina sebesar 20% seperti penelitian-penelitian terdahulu karena didapatkan nilai kekerasan dan nilai keausan yang terbaik pada jumlah fraksi penambahan sebanyak ini (Alief, 2015). Dengan adanya partikel alumina maka akan terbentuk

ikatan *interface*. Ikatan interface dalam jumlah besar akan meningkatkan kekuatan kekerasan dan ketahanan aus dari material. Hasil pengujian keausan pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai keausan tertinggi terdapat pada variasi kecepatan putaran sebesar 1000 rpm. Laju keausan yang tinggi ini disebabkan oleh terlepasnya partikel alumina yang terdapat pada permukaan spesimen saat dilakukan pengujian keausan. Kecepatan yang semakin rendah mengakibatkan alumina yang terkumpul tidak tersebar merata. Dengan terkumpulnya alumina karena kecenderungan gaya kohesi pada partikel alumina semakin besar. Fenomena ini mengakibatkan sudut kontak antar matriks dengan penguat semakin besar. Sudut kontak yang semakin besar mengakibatkan penurunan pada *wettability* antara aluminium dengan alumina. (Chawla, 2006). *Wettability* sendiri berpengaruh pada pembentukan ikatan *interface* pada *metal matrix composite*. Ikatan *interface* berfungsi untuk menyalurkan tegangan yang diterima oleh aluminium sebagai matriks ke penguat yang berupa alumina (Chawla, 2006). Oleh karena itu, dengan buruknya *wettability* akan menghasilkan ikatan *interface* yang buruk pula sehingga menyebabkan partikel alumina terlepas dari matriksnya ketika dikenai pengujian keausan.



Gambar 4. 9 Grafik Nilai Laju Keausan

Pada gambar 4.7 menunjukkan grafik hasil pengujian keausan pada spesimen AMC hasil pengecoran sentrifugal dengan variasi kecepatan putaran. Nilai laju keausan semakin menurun sesuai dengan bertambahnya variasi kecepatan putaran yaitu dari variasi putaran sebesar 1000 rpm hingga variasi putaran sebesar 2500 rpm. Semakin kecil laju keausan menandakan ketahanan aus meningkat dan semakin besar nilai laju keausan menandakan ketahanan aus menurun.

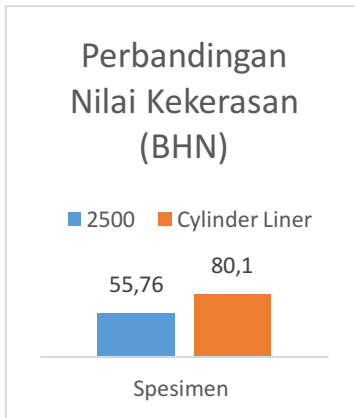
4.4 Material Pemanding

Material yang digunakan berasal dari *cylinder liner* motor yang dijual dipasaran .Dilakukan pengujian kekerasan dan keausan dengan metode yang sama seperti yang dilakukan pada hasil coran sentrifugal yaitu dengan *Brinnel Hardness Test* untuk uji kekerasan seta *dry sliding pin on disc* untuk uji keausan. Pada tabel 4.4 ditunjukkan bahwa *cylinder liner* motor yang dijual pasaran memiliki nilai kekerasan yang lebih besar serta nilai laju keausan hasil coran yang didapatkan juga lebih besar sehingga dapat dikatakan sifat mekanik pada *cylinder liner* yang dijual

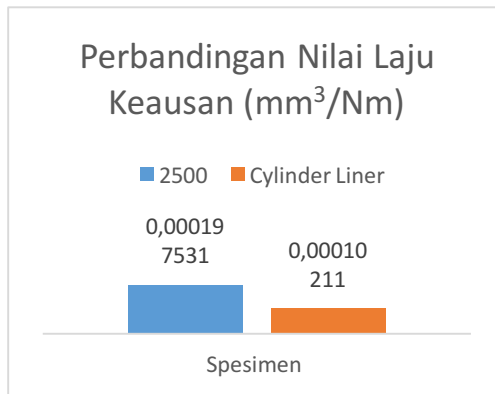
dipasaran lebih baik daripada hasil coran pada penelitian ini. Untuk memperjelas perbandingan data yang diperoleh maka nilai kekerasan dan nilai laju keausan spesimen cor dengan *cylinder liner* digambarkan oleh diagram batang pada gambar 4.9 (a) Nilai Kekerasan dan (b) Nilai laju keausan. Perbedaan yang signifikan antara nilai kekerasan serta nilai laju keausan spesimen cor dan *cylinder liner* dikarenakan material *cylinder liner* yang dijual dipasaran adalah *cast iron* (lampiran)

Tabel 4. 4 Tabel data uji mekanik Spesimen Hasil Coran dengan *Cylinder liner*

Data Spesimen		Kekerasan (BHN)	Keausan (mm ³ /Nm)
Spesimen Cor	1000	54,03	0,000320988
	1500	54,43	0,000271605
	2000	54,86	0,000246914
	2500	55,76	0,000197531
<i>Cylinder Liner</i>		80,1	0,0000211



(a)



(b)

Gambar 4. 10 Perbandingan (a) Nilai Kekerasan dan (b) Nilai laju keausan antara Spesimen Cor dengan Cylinder Liner

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Struktur mikro produk menunjukkan persebaran alumina pada matriks aluminium. Terlihat lubang bekas melekatnya alumina serta beberapa jenis cacat pengecoran seperti porositas, *shrinkage* dan inklusi.
2. Nilai kekerasan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran sentrifugal yang diaplikasikan yaitu pada kecepatan putaran sebesar 1000 rpm hingga 2500 rpm. Peningkatan ini terjadi karena semakin tinggi kecepatan yang diaplikasikan maka gaya sentrifugal yang dihasilkan juga semakin besar sehingga hasil coran semakin mampat. Porositas lubang yang terbentuk juga semakin sedikit. Porositas akan menyebabkan pergerakan dislokasi matriks menjadi lebih mudah. Dislokasi yang mudah terjadi menyebabkan diameter hasil indentasi semakin besar, sehingga nilai kekerasan menurun.
3. Nilai laju keausan mengalami penurunan seiring bertambahnya kecepatan putaran sentrifugal yang diaplikasikan yaitu pada kecepatan putaran sebesar 1000 rpm hingga 2500 rpm. Kecepatan yang semakin tinggi menyebabkan menurunnya laju keausan karena banyaknya ikatan *interface* yang terbentuk. Semakin kecil laju keausan menandakan ketahanan aus meningkat sedangkan semakin besar nilai laju keausan menandakan ketahanan aus menurun.

5.2 Saran

1. Sebaiknya *converter* pengatur kecepatan putaran pada mesin *centrifugal casting* yang digunakan pada penelitian ini lebih diperhatikan dan dicek lagi karena saat proses pengecoran putaran dapat melambat atau meningkat dengan sendirinya.
2. Sebaiknya membeli alumina (Al_2O_3) yang memiliki label komposisi sehingga mudah diketahui ukuran partikel.
3. Penambahan unsur Mg dapat meningkatkan wettability partikel alumina terhadap matriks aluminium

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Kok, M. (2005). *Matrials Processing Technology*. USA: Journal Of Machine Tools and Manufacture.
- Kishawy, K. S. (2006). *International Journal of Machine Tools 7 Manufacture*. USA: Machine Tools and Manufacturer.
- Parvin-Rahimian, N. (2011). *The Characteristic of Alumina Particle Reinforced Pure Al Matrix Composite*. India: Proceeding of The International Congress on Advance in Appllies Physics and Material Science.
- Chennakesava, A. R. (2011). *Strengthening Mechanism and Fracture Bahavior of Al-Al₂O₃ Metal Matrix Composite*. India: Departement of Mechanical Engineering. JNTUH College of Engineering.
- Alief, K. B. (2015). *Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Fraksi Volume Al₂O₃ Pada Matriks Aluminium Terhadap Nilai Laju Keausan Pada Metal Matrix Composite*. Surabaya, Indonesia: Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wibowo, T. A. (2016). *Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Al₂O₃ Terhadap Kekuatan Tarik pada Metal Matrix Composite*. Surabaya, Indonesia: Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Patil, R. T. (2015). *Causes of Casting Defects with Remedies*. India: Journal of Engineering Research & Technology.

- Dyzia, A. J. (2012). Fabrication Of Aluminium Composites Reinforced With Powders and Ceramics Preforms By A Centrifugal Process. *The 19th International Conference On Composite Materials*, 19.
- Prabu, S. B. (2004). Influence of Stirring Speed and Stirring Time On Distribution of Particles in Cast Metal Matrix Composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 171.
- Ramnath, B. V. (2013). *Aluminium Matrix Composite*. West Tambaram, India: Departement of Mechanical Engineering Sri Sairam Engineering College.
- Nayiroh, N. (2013). *Teknologi Material Komposit*. Malang: Universitas Islam Negeri Malang.
- Sukma, H. (2015). *Peran Penguat Partikel Alumina dan Silikon Karbida terhadap Kekerasan Material Komposit Matriks Aluminium*. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Pancasila.
- Juriani, A. (2015). *Casting Defects Analysis in Foundry and Their Remedial Measures with Industrial Case Studies*. India: Journal of Mechanical and Civil Engineering.
- Swasono, T. (2010). *Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Matriks Logam Al5Cu/Al2O3 Melalui Proses Thixoforming*. Depok, Jawa Barat, Indonesia: Magister Teknik Universitas Indonesia.
- George, T. T. (2003). *Aluminium Handbook*. USA: Aluminium Handbook Vol 1 Physical Metallurgy and Process.

- Auerkari, P. (1996). *Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics*. Finland: Technical Research Centre of Finland.
- Wei, S. (2008). *Centrifugal Casting ASM Handbook* (Vol. 15). USA: ASM International.
- ASM, I. (1990). *Casting* (Vol. 15). USA: ASM International.
- Chawla, K. K. (2006). *Metal Matrix Composite*. USA: Springer.
- Bonollo, F. (2003). *Cylinder Liners in Aluminium Matrix Composite by Centrifugal Casting*. Italy: Materiali Compositi.
- Noventio, B. (2018). *Pengaruh BiFlm Terhadap Respon Artificial Aging Paduan Aluminium ADC12*. Surabaya: Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

